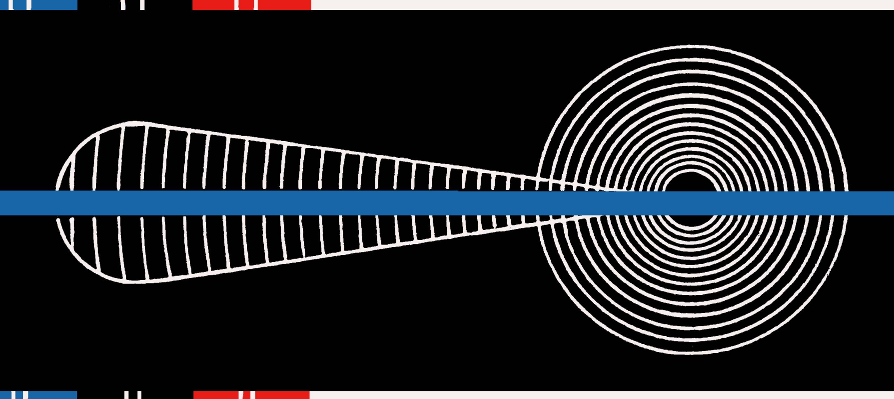




Ю. БОРИСОВ

ЛАЗЕР СЛУЖИТ ЧЕЛОВЕКУ

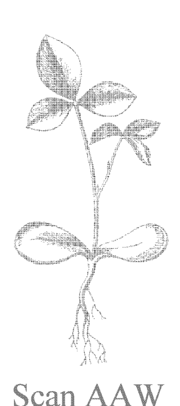


МАССОВАЯ
РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 835

Ю. БОРИСОВ

ЛАЗЕР СЛУЖИТ ЧЕЛОВЕКУ





«ЭНЕРГИЯ» · МОСКВА 1973

6Ф0.3
Б 82
УДК 621.378.3

Борисов Ю.

Б 82 Лазер служит человеку. М., «Энергия», 1973.

72 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 835).

Кратко изложены принцип действия и характеристики оптических квантовых генераторов (лазеров). Рассказывается об основных направлениях применения этих генераторов в промышленности, науке и технике. Рассматриваются перспективы их дальнейшего использования в народном хозяйстве.

Книга рассчитана на широкие круги читателей, интересующихся новыми направлениями современной радиоэлектроники.

$Б\frac{0345\text{-}046}{051(01)\text{-}73}$ 262-73 6ФО.3

ЮРИЙ БОРИСОВ

ЛАЗЕР СЛУЖИТ ЧЕЛОВЕКУ

Редактор *И В. Лебедева*
Редактор издательства *Т. В Жукова*
Технический редактор *Т. Н. Хромова*
Корректор *А. К. Улегова*

●

Сдано в набор 29/XI 1972 г. Подписано к печати 26/VIII 1973 г. Т-13904 Формат 84×108[1]/32 Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 3,78 Уч.-изд л.5,27 Тираж 50.000 экз. Зак. № 803
Цена 22 коп.

●

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Владимирская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В середине 50-х годов возникло и начало интенсивно развиваться новое направление в современной науке — квантовая электроника. Ее возникновение было подготовлено значительными достижениями таких наук, как квантовая механика, физика, радиоспектроскопия, радиофизика, теория излучения, электронная и полупроводниковая техника, светотехника, оптика и др.

Вначале принципы квантовой электроники были использованы учеными при исследованиях проблем генерации, распространения и приема излучений сверхвысокочастотного диапазона радиоволн. В 1954—1955 г. Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым в Советском Союзе, Ч. Таунсом, Дж. Гордоном и Х. Цайгером в США и Дж. Вебером в Канаде почти одновременно были предложены новые методы генерации и усиления электромагнитных СВЧ колебаний. Ими были созданы первые квантовые генераторы СВЧ диапазона — молекулярные квантовые генераторы (МКГ) сантиметровых радиоволн на аммиаке (мазеры), обладающие чрезвычайно высокой стабильностью частоты излучаемых колебаний.

Благодаря высокой стабильности частоты излучаемых колебаний молекулярные СВЧ генераторы стали применяться в службе времени, астрономии и навигации для создания первичных эталонов частоты и времени — атомных и молекулярных часов, погрешность хода которых не превышает одной секунды за несколько тысяч лет. МКГ отличаются также очень низким уровнем собственного шума, поэтому применение их в радиотехнике в качестве усилителей СВЧ колебаний позволило в сотни раз повысить чувствительность радиоприемных устройств. Применение квантовых усилителей в аппаратуре дальней радиосвязи, радиотелескопах и радиолокаторах привело к значительному увеличению дальности действия этих установок. За проведение фундаментальных исследований в области квантовой электроники и разработку первых отечественных МКГ Н. Г. Басову и А. М. Прохорову в 1959 г. была присуждена Ленинская премия.

Квантовые генераторы используют при работе запасы внутренней энергии атомов и молекул вещества. Их действие основано на эффекте усиления электромагнитных колебаний при вынужденном (индуцированном) излучении атомов и молекул под воздействием внешнего электромагнитного поля. Идея возможности вынужденного излучения частиц в некоторых средах была впервые высказана А. Эйнштейном в 1917 г. и около сорока лет оставалась в области теоретических предположений.

Возможность создания среды для усиления световых колебаний была впервые отмечена в 1939—1940 г. советским ученым В. А. Фаб-

рикантом, теоретически сформулировавшим необходимые для этого условия. В начале 50-х г. совместно с Ф. А. Бутаевой и М. М. Вудынским он получил первые экспериментальные подтверждения своих теоретических расчетов. Дальнейшие исследования, проведенные в конце 50-х г. советскими учеными во главе с Н. Г. Басовым, установили принципиальную возможность генерации и усиления квантовыми приборами электромагнитных колебаний инфракрасного и видимого диапазонов волн оптического спектра. К аналогичным выводам в те же годы пришли американские ученые Ч. Таунс и А. Шавлов.

Первый импульсный квантовый генератор оптического диапазона волн (оптический квантовый генератор или лазер) на кристалле синтетического рубина, излучавший красный свет, был создан в США в конце 1960 г. Т. Мейманом, а в 1961 г. в США появился первый газовый оптический квантовый генератор (ОКГ) непрерывного действия на смеси инертных газов гелия и неона, созданный В. Беннетом, А. Джаваном и Д. Гарриоттом. Годом позже в СССР и США были одновременно созданы полупроводниковые квантовые генераторы оптического диапазона волн на арсениде галлия.

В настоящее время диапазон волн, излучаемых ОКГ, охватывает практически весь оптический диапазон и простирается от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области спектра электромагнитных волн. В качестве активной среды в ОКГ применяется более сотни различных твердых, газообразных и жидких веществ.

Создание лазеров является крупнейшим достижением современной науки. Оно послужило толчком для бурного развития квантовой электроники, занимающейся разработкой теории и методов создания квантовых приборов, а также применением их в различных областях науки и техники За фундаментальные исследования в области квантовой электроники, приведшие к созданию квантовых генераторов и усилителей сантиметрового и оптического диапазонов волн, Академия наук Швеции в 1964 г. присудила Нобелевскую премию по физике советским ученым Н. Г. Басову и А. М. Прохорову совместно с американским ученым Ч. Таунсом.

Сразу же после появления лазеры вызвали к себе большой интерес со стороны специалистов различных областей науки и техники благодаря таким своим свойствам, как монохроматичность и высокая когерентность излучаемых колебаний, а также благодаря возможности формирования этими генераторами очень узких, «игольчатых» пучков излучения с высокой концентрацией в них электромагнитной энергии. Монохроматичность (одноцветность) излучения лазеров обусловила чрезвычайно высокую спектральную плотность энергии их излучения, соответствующую плотности энергии излучения источника, имеющего температуру порядка 10^{18} °К (для сравнения заметим, что температура Солнца составляет около 6 000 К).

В последующие годы во многих странах широко развернулись работы по проведению исследований самих лазеров, а также по изучению возможных областей их практического применения. В 1962—1964 гг. были созданы первые образцы различных устройств, в которых использовались лазеры: системы связи, дальномеры, локаторы, сверлильные и сварочные аппараты, медицинские приборы и др. С каждым годом практическое применение лазеров в различных отраслях промышленности и научных исследованиях расширяется. В настоящее время, пожалуй, затруднительно даже просто перечислить все известные и намечающиеся области применения ОКГ.

В СССР, так же как и за рубежом, идут широким фронтом работы по применению лазеров в различных областях народного хозяйства. Начиная с 1965 г. отечественная промышленность освоила серийное производство лазеров различных типов. Некоторые из них, а также ряд лазерных технологических установок были показаны в 1965 г. в г. Лейпциге на международной ярмарке и на Химической выставке в Москве. В настоящее время советская промышленность приступила к выпуску целого ряда промышленных установок, действие которых основано на использовании лазерного излучения. Эти установки успешно применяют в народном хозяйстве для обработки различных материалов, в геодезии и картографии для измерений расстояния с высокой точностью, в аппаратуре связи для передачи больших объемов информации, в медицине для проведения операций и др.

Директивами XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства нашей страны на 1971—1975 гг. предусматривается дальнейшее ускорение темпов научно-технического прогресса на основе фундаментальных и прикладных исследований в наиболее перспективных областях науки и быстрого внедрения результатов научных исследований в производство. Одной из таких отраслей науки в Директивах названа квантовая электроника.

Разработка и внедрение в народное хозяйство нашей страны новых приборов, созданных на основе лазеров, безусловно, будет способствовать ускорению темпов научно-технического прогресса, повышению эффективности производства и тем самым развитию материально-технической базы совегского общества.

Задачей настоящей книги является познакомить широкие круги читателей с основными направлениями применения лазеров в науке и технике, а также рассказагь о некоторых перспективах дальнейшего применения лазерной техники в народном хозяйстве нашей страны.

Глава первая

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИНЦИПАХ ДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Работа квантовых генераторов основана на использовании запасов внутренней энергии атомов и молекул вещества, образующих микросистемы Из физики известно, что в любых микросистемах элементарные частицы вещества (молекулы, атомы, ионы) находятся в непрерывном движении, взаимодействуя друг с другом и с внешними электромагнитными полями Эти микросистемы называются квантовыми системами, так как их поведение и состояние подчиняются законам квантовой механики. Основным свойством квантовых систем является дискретность (прерывность) их энергетических состояний. Внутренняя энергия их может иметь только вполне определенные значения

Рассмотрим вначале строение простейшего атома — атома водорода. Он состоит из ядра (протона), вокруг которого вращается по орбите электрон. Электрон в атоме может вращаться по орбитам, расположенным на различных, но вполне определенных расстояниях от ядра. В зависимости от того, по какой из этих орбит вращается электрон, он обладает различным запасом энергии (находится на различных энергетических уровнях). Чем дальше от ядра орбита электрона, тем выше его энергия (тем на более высоком энергетическом уровне он находится) и тем большей энергией обладает атом. Промежуточные значения уровней энергии в атоме отсутствуют Изменение энергии электрона может происходить только скачкообразно (дискретно) при переходе его с одного уровня (орбиты) на другой. Основным, наиболее устойчивым состоянием всякой микросистемы является состояние с наименьшим запасом энергии (состояние термодинамического равновесия), при котором электроны занимают уровни с наименьшими запасами энергии, т. е. располагаются на наиболее близких к ядру орбитах. На более высокий уровень электрон может попасть только при условии, что более низкие уровни уже заняты (заселены) другими электронами или под влиянием каких-либо внешних воздействий. Поглотив энергию этого воздействия, электрон переходит на более высокий уровень и таким образом оказывается в состоянии, называемом возбужденным В процессе этого перехода электрон поглощает вполне определенную порцию (квант) электромагнитной энергии. Квант световой энергии называется фотоном При обратном переходе (с высокого на низкий уровень) электрон испускает квант электромагнитной энергии строго определенной частоты Величина энергии кванта, E, равна $h\nu$, где h — постоянная Планка, а ν — частота излучения, определяемая разностью

энергий E_2 и E_1 уровней, между которыми совершается переход, т. е.

$$\nu = (E_2 - E_1)/h.$$

Чтобы внешнее электромагнитное излучение вызывало переход электрона в возбужденное состояние, его частота должна совпадать с частотой перехода. В этом случае будет происходить резонансное поглощение энергии микросистемой на частоте перехода.

На практике применяются более сложные микросистемы, чем атом водорода. Они состоят из большого числа микрочастиц (атомные или молекулярные системы). В инфракрасном и видимом участках оптического диапазона волн применяются различные твердотельные или газовые микросистемы. При рассмотрении таких систем необходимо учитывать взаимное влияние атомов и их взаимодействие с внешними электромагнитными полями. В результате этого взаимодействия некоторая часть атомов в системе всегда будет находиться на более высоких уровнях, причем в соответствии с законом Больцмана — чем выше уровень, тем меньше количество находящихся на нем атомов (населенность уровня). При понижении температуры вещества населенность верхних уровней также падает Положение частиц на верхних уровнях не является неизменным, они могут самопроизвольно переходить с одного уровня на другой. При самопроизвольном (спонтанном) переходе на нижние уровни атомы системы хаотически излучают кванты световой энергии (фотоны) на различных длинах волн, т. е. происходит некогерентное (не согласованное по фазе и направлению) излучение колебаний на различных частотах, занимающих довольно большой участок спектра. Примером такого излучения является излучение обычных источников света — ламп накаливания, газосветных ламп, свечение гнилушек и т. п.

Если переход атома с верхнего уровня на нижний происходит под воздействием внешнего электромагнитного поля, частота которого соответствует частоте перехода, то возникающее в этом случае излучение называется вынужденным (индуцированным или стимулированным). В этом случае атомы отдают свою избыточную энергию в виде когерентного электромагнитного излучения. При таком индуцированном излучении все частицы микросистемы колеблются одновременно и в одной фазе, т. е. когерентно Это излучение занимает очень узкий спектр частот и является почти монохроматичным. Таким образом, для получения индуцированного излучения искусственно создается такая возбужденная квантовая система, в которой частицы находятся преимущественно на верхних уровнях (т е. система с обратной или инверсной населенностью). Такая микросистема называется активной средой. Для получения в микросистеме инверсной населенности Н. Г. Басовым и А М Прохоровым был предложен универсальный метод трех уровней.

В системе, построенной по этому методу, происходят следующие процессы (рис. 1) В результате воздействия на систему достаточно интенсивного поля $E_{вн}$ с частотой, равной частоте перехода между 1-м и 3-м уровнями ($\nu_{1,3}$), возникают переходы между этими уровнями В результате происходит уменьшение населенности 1-го N_1 и возрастание населенности 3-го уровня N_3. Спустя некоторое время с этого уровня часть частиц спонтанно перейдет на 1-й, а другая — на 2-й уровень. При этом скорость перехода частиц с 3-го уровня на 2-й больше скорости их перехода на основной 1-й. В результате на 2-м уровне происходит накопление частиц и населенность его N_2

становится больше населенности N_1 основного уровня. Таким образом, в системе возникает инверсная населенность уровней, необходимая для получения индуцированного излучения. На 2-м уровне частицы некоторое время остаются, а затем начинают возвращаться в основное состояние с излучением световой энергии $E_{изл}$ на частоте перехода между 2-м и 1-м уровнями ν_{21}. Индуцированное излучение при этом переходе возникает вследствие того, что первый же

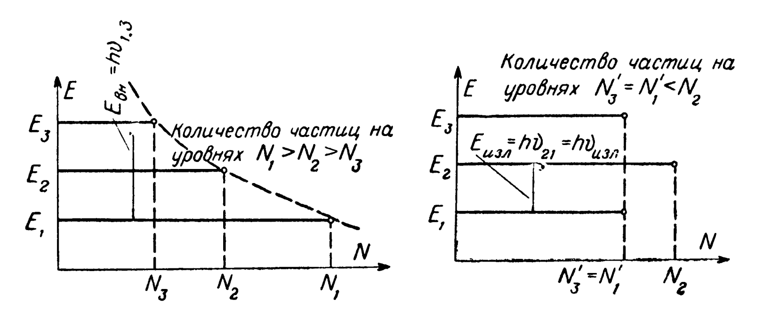


Рис. 1. Схема трехуровневой системы.

излучаемый фотон создает поле, воздействующее на соседние возбужденные атомы и вызывающее переход их в основное состояние, во время которого происходит излучение фотонов той же самой частоты.

Таким образом, излучение одного фотона вызывает в активной среде излучение фотонов другими возбужденными атомами. Интенсивность этого процесса будет возрастать с увеличением протяженности активной среды. Однако при такой «цепной реакции» далеко не все возбужденные атомы среды подвергаются стимулирующему воздействию других фотонов, и коэффициент использования возбужденных атомов получается незначительным. Для увеличения этого коэффициента было предложено поместить активную среду между двумя плоскими параллельными зеркалами, заставив тем самым стимулирующие фотоны пролетать много раз через среду, отражаясь от зеркал. Система из двух параллельных зеркал (интерферометр Фабри-Перо) представляет собой резонатор оптического диапазона волн. Если в таком резонаторе излучение падает на поверхность зеркала под углом, близким к 90°, то оно, отражаясь от обоих зеркал, будет многократно проходить через активную среду, при этом каждый раз будет происходить увеличение интенсивности излучения (усиление) за счет пополнения его энергией фотонов стимулированного излучения. Если одно зеркало выполнить полупрозрачным, то часть излучения сможет выходить через него во внешнюю среду (излучение, падающее на зеркала под углом, отличным от 90°, будет выходить из резонатора без усиления). Излучение, выходящее из резонатора через полупрозрачное зеркало, будет обладать очень малым углом расходимости (конусностью) и практически будет иметь вид тонкого «игольчатого» луча Если в процессе прохождения излучения между зеркалами за один проход усиление его будет достаточным для превышения потерь, вызванных поглощением в зеркалах и среде,

излучением через полупрозрачное зеркало наружу и излучением через боковые открытые стенки резонатора, то в активной системе возникнут устойчивые электромагнитные колебания светового диапазона волн. Такая система получила название оптический квантовый генератор, или лазер.

Любой лазер должен состоять, таким образом, из следующих трех основных частей: активного вещества, оптического резонатора и источника энергии для перевода системы в возбужденное состояние, так называемого источника «накачки». В настоящее время существуют четыре вида активных сред, в соответствии с которыми лазеры подразделяются на следующие четыре типа: лазеры на твердом теле, газовые лазеры, полупроводниковые и жидкостные. Наибольшее развитие получили первые три типа.

В зависимости от типа лазера в качестве источников накачки применяются мощные газоразрядные лампы (оптическая накачка), электрический ток, пропускаемый через активную среду, поток быстрых электронов и целый ряд других методов.

Первым практически созданным лазером был твердотельный генератор, в котором активной средой служил цилиндрический стержень — кристалл синтетического рубина. Торцы рубинового стержня были выполнены взаимно параллельными, а их поверхности (для образования оптического резонатора) — оптически плоскими. Для придания торцам отражающих свойств на них было нанесено серебряное покрытие таким образом, что один торец стал полностью отражающим зеркалом, а другой — пропускал наружу примерно 2% падающего излучения (полупрозрачное зеркало). Для возбуждения (накачки) активной среды такого рубинового лазера применяется импульсная газоразрядная лампа-вспышка, заполненная смесью газов неона и криптона, дающая зеленое свечение. Лампа-вспышка помещается внутри специального металлического рефлектора, направляющего ее излучение на рубиновый стержень. Источником питания лампы-вспышки служит периодически заряжаемый конденсатор большой емкости. Импульсный рубиновый лазер излучает при комнатной температуре красный свет на волне 0,6943 *мкм*. Его излучение имеет очень узкую полосу (порядка 10^{-4} *мкм*) и образует тонкий луч с угловой расходимостью порядка 0,1°. Энергия импульса может изменяться для различных образцов прибора от долей джоуля до нескольких джоулей. При этом средняя мощность рубинового лазера является низкой из-за малой частоты следования импульсов, но импульсная мощность может быть доведена до очень большой величины. Длительность импульсов светового излучения этого лазера колеблется от нескольких миллисекунд до наносекунд. В более поздних конструкциях твердотельных лазеров был предложен резонатор с внешними (вынесенными) зеркалами и стержнем активного вещества, полированные параллельные торцы которого не имеют покрытия. Такая конструкция резонатора оказалась более удобной в эксплуатации.

Другим широко распространенным активным материалом, применяемым в мощных импульсных твердотельных лазерах, является стекло с присадкой неодима (неодимовое стекло). Эти лазеры излучают в ближнем инфракрасном диапазоне на волне 1,06 *мкм*. При такой же энергии излучения лазеры на стекле имеют обычно несколько большие размеры, чем рубиновые, из-за худших параметров активного вещества, но технология производства стеклянных стержней значительно проще, чем выращивание синтетических монокри-

сталлов достаточно больших размеров. В настоящее время найдено уже большое количество различных твердых веществ, пригодных для применения в качестве активных сред для лазеров. К ним относятся фтористый кальций, вольфрамат кальция, соли молибденовой кислоты с присадками в виде редкоземельных элементов. Однако большинство этих веществ может давать лазерное излучение только при охлаждении их до низких температур. Излучение существующих твердотельных лазеров охватывает диапазон волн приблизительно от 0,6100 до 26 *мкм*.

Размеры стержней из рубина и других лазерных материалов определяются технологическими возможностями изготовления. Длина их может доходить до нескольких десятков сантиметров, а диаметр — до единиц сантиметров. Обработка стержней, особенно торцевых граней, выполняется с очень высокой, оптической точностью.

Одновременно проводятся исследования, направленные на создание твердотельных лазеров, работающих в режиме непрерывного излучения. Уже найден ряд материалов (иттриево-алюминиевый гранат с неодимом, вольфрамат кальция с неодимом, рубин), от которых при комнатной температуре получено непрерывное излучение мощностью в десятки ватт.

Вскоре после создания твердотельного импульсного рубинового ОКГ появился первый газовый лазер непрерывного излучения, у которого активным веществом служила смесь инертных газов гелия и неона Газовый лазер состоит из стеклянной трубки с газовой смесью из семи частей гелия и одной части неона. Торцы трубки заканчиваются пластинами, расположенными под углом к падающему излучению, при котором отражение излучения от поверхности пластины является минимальным (так называемый угол Брюстера). Снаружи пластин располагаются отражающие зеркала, образующие оптический резонатор. Необходимая инверсия населенностей в активной среде в этом типе ОКГ создается путем пропускания через заполняющую трубку газовой смеси электрического разряда, возбуждающего атомы гелия, которые в свою очередь возбуждают атомы неона, дающие индуцированное излучение. Длина газоразрядной трубки у этих лазеров обычно не превышает 1 *м*, выходная мощность в непрерывном режиме составляет доли ватта. В импульсном режиме от них получены мощности в сотни ватт. Установлено, что в качестве активного вещества в газовых лазерах могут быть использованы и многие другие газы, которые могут дать когерентное излучение на нескольких сотнях различных частот в диапазоне от УФ до дальнего ИК излучения. Наиболее широкое распространение получили газовые лазеры на аргоне (0,5 *мкм*), смеси газов гелия и неона (0,6328 *мкм*) и на углекислом газе (10,6 *мкм*). Преимуществами газовых ОКГ являются более высокая, чем у лазеров на твердом теле, когерентность излучения и меньшая его расходимость (более высокая направленность). При хорошей конструкции эти лазеры обладают также высокой стабильностью частоты излучения.

Третьим типом лазеров, получившим распространение, являются полупроводниковые ОКГ (ПКГ). Наибольшее развитие получили полупроводниковые лазеры на арсениде галлия. В отличие от твердотельных и газовых лазеров, у которых энергия излучения большей частью не превышает нескольких долей процента от энергии возбуждения, у полупроводниковых лазеров это отношение может достигать 70—80% Такая высокая эффективность преобразования энергии возбуждения в излучение достигается благодаря тому, что в дан-

ном случае для накачки лазера используется, пропускаемый через полупроводник электрический ток, энергия которого непосредственно преобразуется в когерентное излучение. Это позволяет также достаточно просто управлять излучением (модулировать его) путем изменения интенсивности тока накачки.

Конструктивно полупроводниковый лазер устроен подобно обычному плоскостному полупроводниковому диоду с *p-n* переходом (диодный лазер) размером в десятые доли миллиметра, так что такой диодный лазер является очень компактным прибором. При прохождении через *p-n* переход тока происходит рекомбинация пар электрон — дырка, сопровождающаяся излучением квантов электромагнитной энергии. Для возникновения в полупроводниковом диоде стимулированного излучения необходимо, чтобы на *p-n* переходе была создана очень высокая плотность тока, порядка нескольких тысяч ампер на квадратный сантиметр. При дальнейшем повышении плотности тока происходит увеличение интенсивности излучения лазера. Большая плотность тока, проходящего через *p-n* переход, вызывает разогрев активного вещества, поэтому полупроводниковые лазеры обычно требуют применения охлаждения до температуры жидкого азота (78 °К) или даже до еще более низких температур.

В настоящее время существует целый ряд полупроводниковых материалов, применяемых в качестве активной среды в ПКГ и дающих излучение в диапазоне, ограниченном примерно волнами от 0,5 до 8,5 *мкм*. Работают эти лазеры в импульсном режиме, на отдельных фиксированных волнах. Длина волны излучения определяется составом активного вещества. Так, лазер на арсениде галлия излучает на волне 0,84 *мкм*. В последнее время от некоторых полупроводниковых лазеров получено также излучение в непрерывном режиме Мощность излучения полупроводниковых лазеров в импульсном режиме достигает десятков ватт (при длительности импульсов в несколько микросекунд и более коротких импульсах), в непрерывном режиме — единиц ватт. Расходимость излучения у этих лазеров самая большая (достигает единиц градусов), что объясняется малыми размерами резонатора, образованного гранями кристалла полупроводника.

Управление (модуляция) лазерным излучением может осуществляться методами внутренней и внешней модуляции. При внутренней модуляции воздействие на излучение осуществляется в процессе его генерации в самом лазере. Для внешней модуляции излучения применяются специальные механические или электрооптические модуляторы (ЭОМ), устанавливаемые на пути распространения луча лазера после его выхода из резонатора. Модуляция излучения лазера может производиться по одному из четырех параметров, характеризующих электромагнитную волну: амплитуде, частоте, фазе и поляризации. Наибольшее распространение в настоящее время получила модуляция лазерного излучения по интенсивности (амплитуде) как самая простая.

Внутренняя модуляция излучения может быть осуществлена путем воздействия на генератор накачки, активное вещество или резонатор лазера. Наиболее простым методом импульсной внутренней модуляции по интенсивности у твердотельных лазеров является периодическое включение источника накачки — лампы-вспышки. Наиболее распространенным видом внутренней модуляции твердотельных лазеров является так называемая модуляция (переключение) добротности, заключающаяся в том, что путем вращения одного из

зеркал резонатора скачкообразно изменяется его добротность от максимальной до нулевой. Роль вращающегося зеркала выполняет обычно стеклянная призма с полным внутренним отражением, установленная на оси электромотора. Условие максимальной добротности, при которой происходит генерация в лазере, имеет место только в те моменты, когда вращающееся зеркало (призма) становится точно параллельно неподвижному зеркалу. Перед этим моментом специальное устройство включает лампу-вспышку, переводящую лазерный стержень из активного вещества в возбужденное состояние. Модуляция добротности дает возможность генерировать импульсы очень большой мощности и длигельностью всего в несколько десятков наносекунд.

При внешней модуляции (применяемой обычно для управления колебаниями газовых лазеров непрерывного действия) изменение интенсивности излучения ОКГ происходит путем прерывания его различными механическими затворами (механическая модуляция) или электрооптическими модуляторами. Действие последних основано на использовании магнитооптического (эффект Фарадея) или электрооптического (эффекты Керра или Поккельса) эффектов в веществах. Эти эффекты проявляются в том, что некоторые вещества изменяют свою прозрачность (просветляются) под воздействием прикладываемого внешнего магнитного или электрического поля. Это позволяет использовать их также в качестве затворов для осуществления внутренней импульсной модуляции в твердотельных лазерах. Для этой цели оптическое устройство (ячейка) с одним из таких веществ помещается внутри лазерного резонатора между одним из зеркал и торцом стержня активного вещества. При помощи этой ячейки можно изменять добротность резонатора в широких пределах. Лазер получает возможность генерировать только в тот момент, когда на короткое время происходит просветление ячейки (открывание затвора) под воздействием импульсов электрического (или магнитного) поля, прикладываемого после окончания процесса возбуждения активного вещества.

Глава вторая

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Появление лазеров, дающих излучение большой мощности, открыло широкие возможности для разработки новых, более совершенных технологических процессов в различных отраслях народного хозяйства. Высокая монохроматичность и когерентность излучения лазера позволяют фокусировать его луч на поверхности обрабатываемого материала с помощью простой оптической системы. Сфокусированный лазерный луч может испарять самые тугоплавкие материалы. При этом величина излучаемой энергии и длительность воздействия излучения на вещество у современных лазеров могут изменяться в достаточно широких пределах, что и позволяет применять их для выполнения самых разнообразных технологических операций.

Для осуществления технологических процессов применяются установки с лазерами различных типов. Очень подходящими для этих целей являются лазеры на иттриево-алюминиевом гранате, обладающие импульсной мощностью излучения 5 *квт* при частоте следования импульсов 1 *кгц*. Эти лазеры могут работать и в непрерывном режиме при средней мощности излучения до 200 *вт*. Большие возможности открывает применение мощных газовых лазеров непрерывного действия на углекислом газе, позволяющих получить мощность излучения до нескольких киловатт.

Воздействие излучения лазера на вещество заключается в передаче энергии его квантов атомам и молекулам тонкого поверхностного слоя обрабатываемого вещества толщиной менее длины волны излучения. При этом кинетическая энергия микрочастиц возрастает, и, следовательно, увеличивается температура облучаемого участка вещества. Значительное повышение температуры вещества в месте его облучения вызывает интенсивное испарение материала (рис. 2).

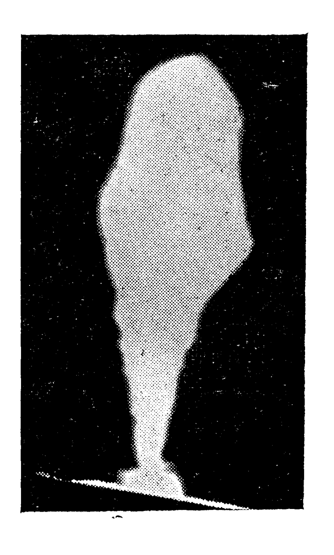


Рис. 2. Испарение металла под действием мощного лазерного излучения, сфокусированного на его поверхности.

Линейные размеры сфокусированного на поверхности материала лазерного луча (пятна) практически ограничиваются только дифракцией и могут достигать величины порядка длины волны излучения (долей микрона); так что вся энергия излучения лазера может быть сконцентрирована на площадке в миллионные доли квадратного сантиметра. При этом плотность энергии на поверхности облучаемой лазером, может на короткое время (в течение тысячных долей секунды) достигать сотен миллиардов ватт на квадратный сантиметр. Это в миллиарды раз превышает концентрацию энергии той же частоты на поверхности Солнца. К положительным свойствам лазера следует отнести кратковременность воздействия его излучения, благодаря чему нагреться до высокой температуры успевает только непосредственно облучаемый участок материала, а всей остальной массе материала тепло практически передаться не успевает.

Степень воздействия лазерного луча на вещество определяется энергией излучения в импульсе, количеством импульсов и частотой их повторения. Больший эффект может быть достигнут не одним импульсом излучения большой энергии, а несколькими импульсами меньшей энергии, следующими друг за другом. Разогрев вещества с его последующим плавлением наступает при плотностях мощности излучения лазера до 10^7 *вт/см*^{2}. При возрастании величины плотности мощности излучения до 10^8—10^{12} *вт/см*^{2} начинается процесс испарения вещества.

В противоположность широко применяемым в настоящее время обычным способам обработка материалов с помощью лазерного луча не требует осуществления механического контакта с обрабатываемым изделием. Она может производиться в любой среде (вакууме, инертном газе, на открытом воздухе) и позволяет обрабатывать труднодоступные участки деталей. При лазерной обработке отсутствует вредно воздействующее рентгеновское излучение (как это имеет место, например, при электроннолучевом методе обработки).

Способность лазеров испарять даже самые тугоплавкие материалы явилась стимулом к развертыванию работ по исследованию возможностей применения их в промышленности. Многочисленные исследования показали, что получившие наибольшее распространение импульсные твердотельные лазеры на кристаллах синтетического рубина целесообразнее всего применять в следующих технологических операциях:

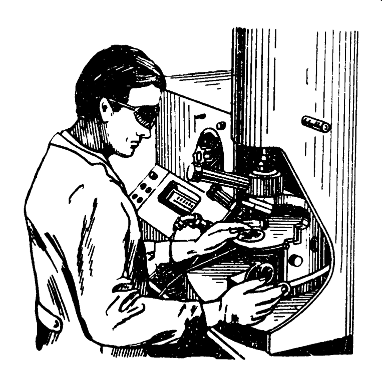


Рис. 3. Внешний вид лазерного сверлильного станка.

прожигание («сверление») отверстий малого диаметра (от нескольких микрон до десятых долей миллиметра) в тонких металлических пластинах толщиной до 0,1 *мм* и в деталях из ферритов, алмаза, рубина и тому подобных твердых материалов;

резание твердых и сварка (пайка) тугоплавких материалов;

подгонка номиналов сопротивления прецизионных резисторов с точностью до 0,05—0,1%;

прорезание щелей шириной в единицы и десятки микрон и нанесечение штрихов на шкалы;

статическая и динамическая балансировка быстро вращающихся деталей без приложения механических усилий.

В СССР и США первыми лазерными технологическими установками явились установки для сверления различных материалов. Простейший лазерный сверлильный станок (рис. 3) представляет собой предметный стол, на котором закрепляется обрабатываемый образец материала. Над столом располагается рубиновый лазер с оптической системой, фокусирующей излучение лазера на образец, и устройство для наведения лазерного луча на выбранный участок поверхности образца При помощи лазера на таком станке оказалось возможным просверливать в материалах отверстия с отношением глубины отверстия к его диаметру до 25 (рис. 4).

Наиболее рациональным с экономической точки зрения является применение лазерных установок для получения отверстий малого диаметра, особенно при обработке алмазных и других волок и рубиновых подшипников для часов. Ввиду большой твердости этих материалов обработка отверстий обычными (механическими) способами очень трудоемка. Например, обработка сквозного отверстия в часовом камне длится от 7 до 25 *мин*, а с помощью лазера это время сокращается до нескольких секунд. Длительность отдельных опера-

ций при изготовлении алмазных волок при использовании лазера удается сократить до нескольких минут В настоящее время советскими специалистами разработана технология обработки часовых камней для промышленного применения. На заводе искусственных алмазов и алмазного инструмента в г. Полтаве специалистами совместно с заводскими инженерами изготовлен специальный лазерный станок для чернового сверления алмазов. Луч лазера пробивает от-

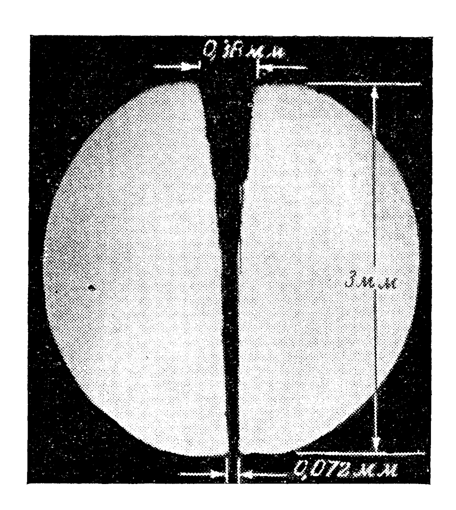


Рис. 4. Отверстие, просверленное лазером в высокоуглеродистой стали толщиной 3 *мм* (отношение глубины отверстия к его диаметру — 12).

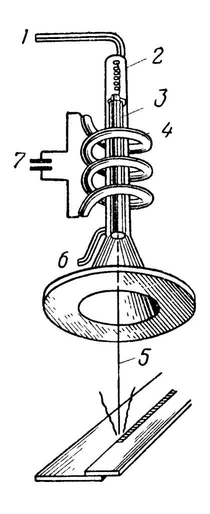


Рис. 5. Схема сварки лучом лазера.

1, *6* — вход и выход охлаждающей жидкости; *2* — стеклянная трубка; *3* — рубиновый стержень; *4*—лампа накачки; *5* — луч лазера; *7* — источник энергии подсветки.

верстие в алмазе за доли секунды, в то время как при сверлении ультразвуком на эту операцию требуется шесть часов.

Другая технологическая операция, эффективно решенная с помощью лазерной установки, — это изготовление фильер с большим количеством отверстий (до 1 500). Существовавший ранее способ их изготовления был основан на механическом прокалывании отверстий специальными пуансонами, быстро приходившими в негодность. Более совершенные керамические фильеры вообще не допускали механической обработки. Применение для этой цели лазеров позволило решить проблему.

Несколько позже лазерный «сверлильный» станок стал применяться для резания и сварки материалов. Применение в установке мощного лазера с высокой частотой повторения импульсов излучения (например, на иттриево-алюминиевом гранате) дает возможность довести скорость резания до 2,5 *см/сек*. Процесс сварки (рис. 5) про-

текает при меньшей энергии излучения лазера, когда обрабатываемый материал не испаряется, а только плавится под воздействием лазерного луча. При этом вследствие малости диаметра луча, кратковременности его воздействия на вещество осуществляется точечная сварка материалов. Лазерное излучение позволяет сваривать любые металлы. Сварное соединение получается по своей структуре однородным, структура соседних участков не нарушается.

В электровакуумной и полупроводниковой промышленности лазерные установки с успехом могут применяться для пайки тонких деталей В некоторых случаях, как, например, при сборке электронных ламп, пайка и сварка тонких деталей могут производиться непосредственно в готовом приборе, поскольку лазерный луч свободно проходит сквозь прозрачную стеклянную колбу прибора на расположенные внутри монтируемые детали.

Особенно эффективна лазерная сварка в микроэлектронике, где она позволяет осуществлять монтаж микросхем и печатных схем, травление микросхем, изготовление электронно-дырочных переходов в полупроводниковых приборах и приварку выводов. Вводные концы к тонкопленочным схемам и полупроводниковым приборам привариваются без коробления и усадки свариваемых материалов, так как благодаря кратковременности воздействия лазерного излучения на материалы в них не успевают развиваться окислительные процессы. Применение лазерной сварки позволяет обеспечить требуемую высокую точность обработки микроэлементов и микросхем, а также высокую надежность и экономическую эффективность технологических операций. Даже при малом к. п. д. существующих лазеров технологические установки на них получаются дешевыми и простыми и в изготовлении, и в работе.

На рис. 6 изображена схема лазерной установки для соединения блоков интегральных схем. На стеклянную подложку методом напыления металла наносятся необходимые межблочные соединения. Таким же способом у интегральных схем создаются соединительные выводы. После этого подложка с нанесенной на нее схемой соединений и интегральные схемы помещаются в специальный шаблон напыленной схемой вниз. С помощью микроманипулятора и микроскопа контакты микросхем соединяются с соответствующими местами схемы соединений и прижимаются к подложке. Затем с помощью микроскопа сфокусированный лазерный луч направляется через стекло на поверхность контакта, при этом выходную мощность лазера регулируют таким образом, чтобы сплавить металл подложки с металлом контакта интегральной схемы.

Шовная сварка с помощью лазера еще не освоена. По предварительным оценкам для получения шовных соединений, например фольговых материалов, необходимо, чтобы лазеры в непрерывном режиме излучения имели выходную мощность 300—500 *вт*, а для получения швов на металлических пластинах — до 10 *квт*. Наиболее подходящими для этого вида сварки, возможно, окажутся разработанные в последние годы лазеры на углекислом газе, выходная мощность которых достигает тысяч ватт при достаточно высоком к. п. д (до 10—20%). В СССР уже создан промышленный вариант лазерной установки на углекислом газе типа ЛУНД-100 с мощностью излучения в непрерывном режиме не менее 100 *вт*. Эта установка предназначена не только для выполнения различных технологических операций, — она с успехом может быть использована для физико-химических исследований, в медицине и т. д. Применению подобных

лазеров для резания тугоплавких и огнеупорных материалов, а также для шовной сварки должна предшествовать большая работа по изучению физических свойств материалов, подвергающихся этому виду лазерной обработки.

Другой областью широкого использования лазерных установок является изготовление прецизионных резисторов. Существующие

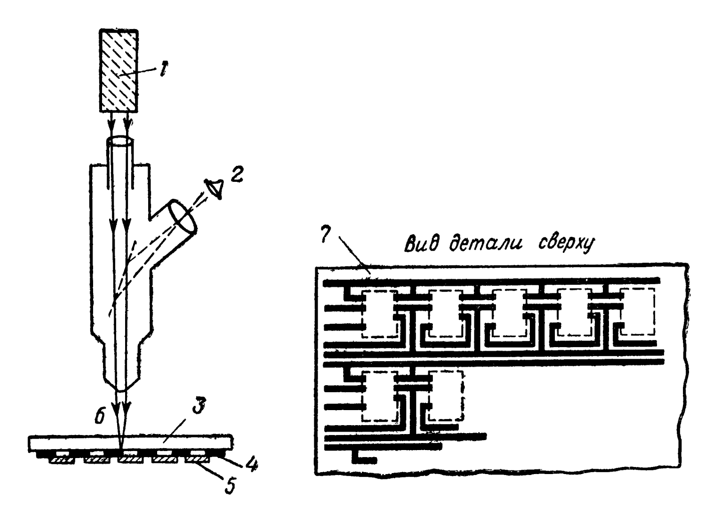


Рис. 6. Схема установки, использующей ОКГ для соединения полупроводниковых схем.

1 — ОКГ; *2* — визуальная настройка; *3* — стеклянная подложка; *4*—осажденная металлическая пленка; *5* — блоки полупроводниковой интегральной схемы; *6* — луч ОКГ; *7* — стеклянная подложка с осажденной схемой межблочных соединений.

установки с высокоточными токарными станками, на которых изготавливаются пленочные резисторы, позволяют получить сопротивления с точностью установки номинала до 0,3%. Повышение точности изготовления резисторов до 0,05—0,1% достигается путем применения лазерной установки с импульсным излучением; излучение этой установки снимает (испаряет) лишнюю часть резистивного состава на поверхности резистора. Эта операция контролируется с помощью микроскопа, которым луч лазера точно наводится на нужный участок. На эту операцию резисторы поступают после изготовления обычным способом с точностью номинального сопротивления 0,5%. После окончания лазерной доводки сопротивления резистор покрывается эпоксидной пленкой.

С 1965 г. отечественная промышленность начала серийное производство различных технологических установок и станков, в которых обрабатывающим «инструментом» служит сфокусированное лазерное излучение. Для сверления и точечной сварки предназначены лазерные технологические установки типа К-, 3, К-3М, К-4, устройства серий «Луч», «Квант» и др. Установки типа СУ-1, УЛ, «Искра»

служат для лазерной сварки. Опыт применения этих установок на многих предприятиях показал, что они обеспечивают эффективное осуществление таких технологических процессов, которые раньше были связаны с большими трудностями или не могли быть выполнены вообще. Далее приведены сведения о некоторых лазерных технологических установках.

Установка К-3 выполнена на рубиновом лазере, работающем в импульсном режиме. Излучение лазера направляется и фокусируется оптической системой на обрабатываемое изделие, закрепленное на предметном столе. Диаметр сфокусированного излучения на обрабатываемом изделии можно регулировать в пределах от 5 до 200 *мкм* Рубиновый лазер излучает за минуту три световых импульса длительностью по 0,5 *мсек* при пробивании отверстий и длительностью по 5 *мсек* при сварке. Энергия излучения его может регулироваться в пределах от 0,001 до 1 *дж* и контролируется специальным измерительным устройством. Максимальная толщина материала, обрабатываемого этой установкой в режиме «сверления», составляет 1 *мм*. Установка К-3 имеет небольшие габариты, проста и надежна в эксплуатации. Она применяется в электронной и радиотехнической промышленности, в точном приборостроении, там, где не требуется высокая производительность, а также при лабораторных исследованиях. На рис. 7 показана обработка металла при помощи установки К-3. Усовершенствованным вариантом этой установки является модель с манипуляторным столом — К-3М, в которой установлен лазер с энергией излучения до 1,5 *дж* и длительностью импульса от 0,5 до 8 *мсек*, имеющий воздушное охлаждение. Частота следования импульсов в установке К-3М составляет до трех импульсов в минуту.

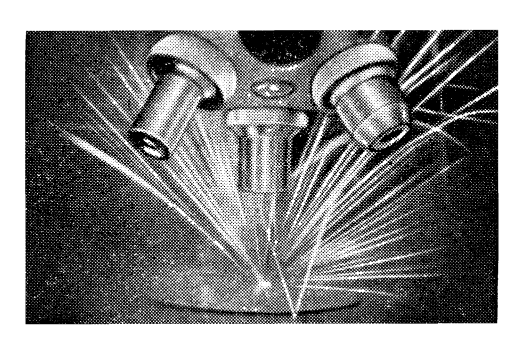


Рис. 7. Лазерная технологическая установка К-3 обрабатывает металл.

Более совершенной и производительной, но соответственно и более сложной является установка К-4. В ней применено водяное охлаждение рубинового лазера, благодаря чему частота его излучения повышена до 1 *имп/сек* при длительности импульсов 0,5 *мсек*. Производительность этой установки в три раза превышает производительность установки К-3.

В установке «Луч-1М» применен импульсный лазер с максимальной энергией излучения 2—3 *дж*, частотой следования импульсов 3 *имп/сек* и длительностью импульсов 2 *мсек*. Лазер имеет замкнутую водяную систему охлаждения. В установке «Луч-10» энергия излучения лазера составляет до 1—2 *дж*, а длительность импульса мо-

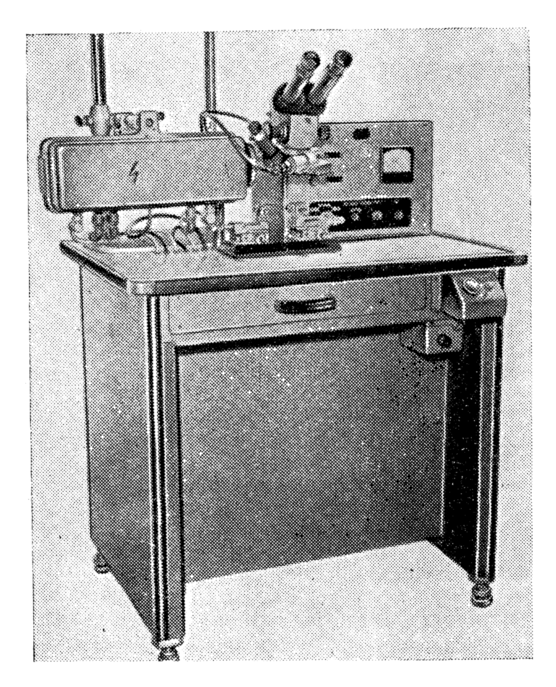


Рис. 8. Сварочная лазерная установка СУ-1.

жет иметь величину 0,5 и 3 *мсек*. Частота следования импульсов в этой установке доведена до 10 *имп/сек*.

Установка СУ-1 (рис. 8) включает в себя рубиновый лазер, излучающий импульсы длительностью 0,5 или 5 *мсек* с частотой повторения 4 *имп/мин*, микроскоп с 84-кратным увеличением и измерительные приборы. Энергия излучения лазера регулируется в пределах от десятых долей джоуля до 1,5—2 *дж* при длительности импульсов 0,5 *мсек* и составляет менее 1 *дж* при большей длительности импульсов. Лазер охлаждается потоком воздуха под давлением 1—1,5 *атм*. Фокусирующая система установки имеет сменную оптику, что позволяет изменять диаметр светового пятна на обрабатываемой поверхности от 50 до 250 *мкм*.

На установке СУ-1 можно выполнять следующие работы: приварить проволоку диаметром 0,1 *мм* к материалу любой толщины, сварить алюминий с никелем, золото с германием и кремнием и другие материалы, механическое соединение которых друг с другом

является весьма сложной, а зачастую и неразрешимой задачей, и пробивать отверстия в различных материалах. Например, один импульс лазера образует в стальной пластине толщиной в 1—1,5 *мм* отверстие с диаметром не менее 70 *мкм*.

Установка УЛ-2 выполнена на лазере, излучающем импульсы длительностью от 1 до 8 *мсек* и частотой повторения до 1 *имп/сек* (1 *гц*). При длительности импульса 2 *мсек* энергия излучения лазера составляет 2 *дж*. Минимальный диаметр пятна 0,01 *мм*. Охлаждение лазера — жидкостное.

В установке УЛ-20 энергия излучения импульсного лазера увеличена до 20 *дж*, а частота повторения импульсов уменьшена до 12 *имп/мин*. Минимальный размер пятна сфокусированного излучения лазера составляет 50 *мкм*. Охлаждение лазера жидкостное.

В установке «Искра-8» использован лазер, дающий импульсы длительностью от 1,2 до 5,6 *мсек* и частотой повторения импульсов до 1 *гц*. Энергия излучения 8 *дж* при длительности импульсов 2 *мсек*. Минимальный диаметр пятна — 0,01 *мм*. Охлаждение лазера жидкостное.

Автоматическая многоцелевая прецизионная лазерная установка с программным управлением «Квант-3» имеет лазер с частотой следования до 40 *имп/мин*. Максимальная энергия излучения лазера составляет 15 *дж* при длительности импульсов от 0,5 до 5,0 *мсек*. Охлаждение лазера водяное. Производительность установки достигает трех операций в секунду при энергии излучения до 2 *дж* и до шести операций в минуту при энергии излучения лазера до 15 *дж*.

Усовершенствованный вариант этой установки — прибор «Квант-9». Он представляет собой уникальное устройство для сверления любых существующих материалов, в частности дает возможность получать отверстия всех форм и размеров, определяемых ГОСТ для алмазных волок. Источником излучения служит лазер на неодимовом стекле с энергией излучения 10 *дж* и частотой следования импульсов 1 *гц*.

Лазерный станок МА-4831 снабжен программным управлением. Он предназначен для резки алмазов, синтетических корундов, сверхтвердых сплавов и прожигания в этих материалах тончайших отверстий. С его помощью возможно «просверлить» десятки отверстий в минуту в тех случаях, когда обычный режущий инструмент вообще неприменим. В этом станке установлены три лазера, что позволяет одновременно выполнять различные технологические операции. Черновая обработка алмазных фильер на этом станке занимает менее одной десятой доли секунды В вольфраме можно получить отверстия диаметром всего в 7 *мкм*, т. е. менее толщины человеческого волоса. Установка МА-4831 — первая из серии специализированных станков, в которых применяются лазерные методы обработки сверхтвердых материалов.

Таким образом, первые шаги в практическом применении лазеров в современной технологии уже сделаны (Обработка деталей лучом лазера. М., «Машиностроение», 1969). Опыт эксплуатации первых установок показал, что даже при очень низком к. п. д. существующих лазеров их применение в энергетическом отношении является очень выгодным при обработке таких сверхтвердых материалов, как, например, алмаз. При повышении к. п. д. лазеров обработку световым лучом будет экономически выгодно применять для любых материалов и на повестку дня встанет вопрос о широком внедрении ОКГ в технологические процессы и методы обработки материалов.

Глава третья

ЛАЗЕРНАЯ СВЯЗЬ

Возможность обмениваться информацией всегда занимала одно из главных мест в жизни человеческого общества, начиная с момента возникновения сознательной жизни на земле. В процессе развития общества происходит непрерывное увеличение потока информации, передаваемой по каналам связи, и одновременно — непрерывное совершенствование самих каналов связи. В настоящее время расширение научных исследований, создание сложнейшей аппаратуры с телемеханическим управлением, а также рост культурных потребностей населения во много раз увеличили потребность человечества в каналах связи Наряду с телеграфной и телефонной связью сейчас широко используется радио- и телевизионная связь, с помощью которой передается масса научной и технической информации. Есть все основания полагать, что в недалеком будущем одними из основных потребителей информации станут вычислительные машины. С увеличением объема информации должны совершенствоваться и средства ее передачи Применяемые в настоящее время радиорелейные, кабельные и прочие линии связи обладают ограниченными возможностями. Поэтому их место должны будут занять новые, более совершенные линии связи, способные передавать непрерывно увеличивающиеся потоки информации, связанные с развитием современного общества.

Известно, что объем информации, который может быть передан каналом связи (т. е. ширина полосы пропускаемых им частот), пропорционален величине несущей частоты, т. е. частоты, на которой ведется передача. При этом с увеличением несущей частоты канала связи необходимая ширина полосы пропускания канала будет занимать относительно меньший участок диапазона электромагнитных колебаний. Таким образом, с уменьшением длины волны можно увеличить число каналов связи и одновременно расширить полосу пропускания каждого из них, т. е. открывается возможность передавать больший объем информации. В настоящее время освоен практически почти весь радиодиапазон от длинных до ультракоротких волн. Он используется для работы множества разнообразных радиовещательных, связных, телевизионных, навигационных и прочих радиостанций. Появилась густая сеть УКВ радиорелейных линий связи и УКВ линии связи через искусственные спутники Земли. Однако потребности человечества в передаче информации растут, и в эфире опять стало «тесно». Снова возникла необходимость использования для связи еще более коротковолновых участков электромагнитного спектра. Создание лазеров, работающих в оптическом диапазоне волн, позволяет решить эту проблему.

Оптический диапазон для целей связи начал применяться еще в середине прошлого столетия, когда появился первый оптический (световой) телеграф. Однако только после открытия в 1960 г. источников когерентного света, излучающих подобно генераторам радиодиапазона синусоидальные колебания, — лазеров стало возможным приступить к реализации всех преимуществ организации связи на световых волнах. Простейшие расчеты показывают, что оптический диапазон волн примерно в 50 000 раз шире радиодиапазона, так как он охватывает область частот в пределах от 3×10^{12} до 15×10^{15} *гц*, в то время как радиодиапазон занимает полосу частот

от 10^4 до 3×10^{11} *гц*. Таким образом, только на участке видимых волн оптического диапазона (примерно от 0,4 до 0,8 *мкм*) может быть расположено в принципе до 80 миллионов телевизионных каналов со стандартной полосой пропускания 6,5 *Мгц*. Вообще полоса пропускания самих каналов связи может быть расширена более чем в 10^5 раз по сравнению с тем, что может быть получено для аналогичных систем, работающих в диапазоне УКВ.

Важным преимуществом использования для связи оптического диапазона волн является также возможность создания на этих волнах очень высоконаправленных систем передачи информации. Это позволяет значительно уменьшить необходимую мощность излучения передатчика связной станции. Для установления связи между двумя пунктами необходимо осуществить концентрацию мощности, излучаемой передатчиком связной станции, в очень узкий пучок (луч). Расходимость излучения электромагнитной энергии определяется соотношением между длиной волны излучения и поперечными геометрическими размерами излучателя (антенны). Поэтому с укорочением длины волны излучаемых колебаний представляется возможным получать более «игольчатые» пучки излучения при тех же размерах антенной системы. Малые длины волн оптического диапазона (микрометры) позволяют получать даже при небольших размерах антенны очень высоконаправленные световые потоки с расходимостью в десятые и даже сотые доли градуса.

Наиболее подходят для применения в оптических линиях связи газовые лазеры, работающие в непрерывном режиме излучения, и полупроводниковые лазеры, способные работать в импульсном режиме с высокой частотой повторения импульсов.

Излучение лазера представляет собой в пространстве пучок почти параллельных лучей. Это дает возможность осуществлять одновременную передачу информации на одной несущей частоте по многим каналам связи без возникновения взаимных помех между ними. Кроме того, малая расходимость лазерного излучения позволяет при малой мощности излучения лазера создать высокую плотность энергии излучения в нужном направлении для передачи информации на большое расстояние Эксперименты по исследованию возможностей наземной лазерной связи показали, что при мощности излучения лазера 0,1 *вт* и ширине луча 3, 6′ в принципе может быть осуществлена связь на расстояние порядка тысячи километров. В установках полупромышленного характера обеспечивается устойчивая связь на расстояниях в 25—30 *км*. В этих установках, как правило, используются газовые гелий-неоновые лазеры, дающие на волне 0,63 *мкм* излучение мощностью в несколько десятков милливатт.

Подобно системам радиосвязи линии лазерной связи (ЛЛС) могут работать с использованием поднесущих частот. В этом случае сигналы, несущие полезную информацию, модулируют колебания СВЧ генератора, которые затем используются для модуляции лазерного излучения. Этот метод позволяет осуществить передачу в полосе частот шириной до нескольких сотен мегагерц. Если поднесущая не используется и лазерное излучение модулируется непосредственно сигналом, несущим информацию, то такая система более узкополосна и может применяться, например, для полевой телефонной малоканальной связи.

ЛЛС могут быть построены по открытой и закрытой схеме. В открытых ЛЛС используется естественная передающая среда (атмосфера Земли, космическое пространство), а в закрытых ЛЛС све-

товые сигналы передаются по специальным трубам — световодам. Структурная схема ЛЛС аналогична схемам обычных систем радиосвязи. Она состоит (рис. 9) из передающей и приемной станций, разделенных между собой средой, в которой распространяется излучение лазера. В состав передающей станции помимо лазера входит (в случае применения газового лазера непрерывного излучения)

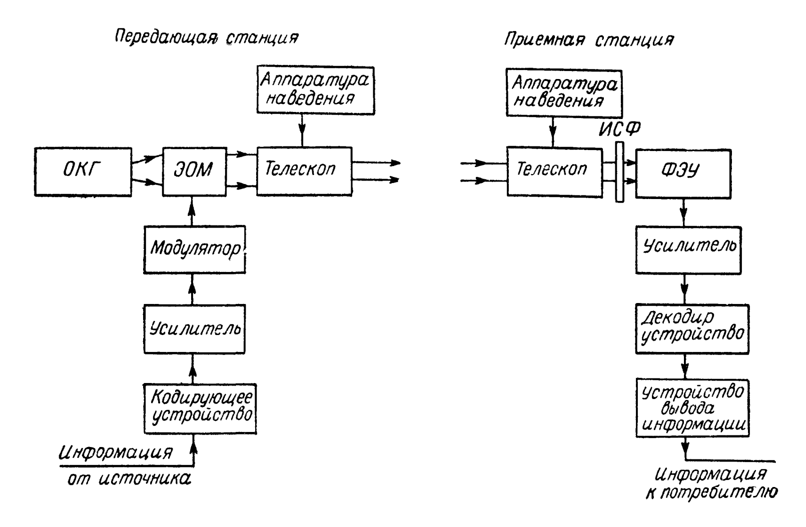


Рис. 9. Структурная схема лазерной линии связи.

электрооптический модулятор (ЭОМ), при помощи которого на излучение лазера накладываются передаваемая информация и антенная система — передающий телескоп с аппаратурой наведения луча на телескоп приемной станции. Приемная станция состоит из приемной оптической системы с аппаратурой наведения на телескоп передающей станции, фотоприемника (ФЭУ) и электронных блоков для преобразования и вывода принятой информации.

На передающей станции ЛЛС узлом, осуществляющим наиболее важную техническую задачу — внешнюю модуляцию лазерного излучения передаваемыми сигналами, является ЭОМ. Наиболее эффективными и, вероятно, перспективными для этой цели являются поляризационные методы модуляции излучения газовых ОКГ оптически активными средами вследствие возникающих в них электрооптических эффектов Керра (в жидких средах) и Поккельса (в твердых средах). ЭОМ, основанные на эффекте Керра (ячейки Керра), не нашли применения в многоканальных ЛЛС из-за того, что возможная полоса частот модуляции у них не превышает нескольких мегагерц. Помимо этого они требуют высокого управляющего напряжения, да и сама жидкая среда (нитробензол), применяемая в ячейке Керра, изменяет со временем свои свойства. Поэтому наибольшее распространение в ЛЛС получили ЭОМ, основанные на эффекте Поккельса в твердых кристаллах из дигидрофосфата аммония

(АДР) или калия (КДР), обладающих пьезоэлектрическими свойствами (ячейки Поккельса). В таком ЭОМ (рис. 10) излучение газового лазера проходит вначале через оптическую систему (объектив), поступает на оптическую призму — поляризатор, при помощи которой определенным образом ориентируются векторы электрического и магнитного полей излучения. Затем этот поляризованный луч ла-

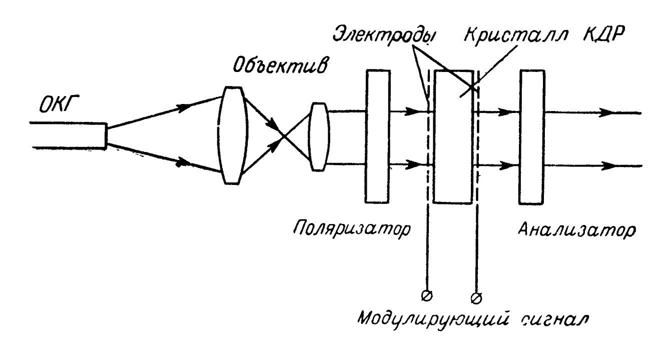


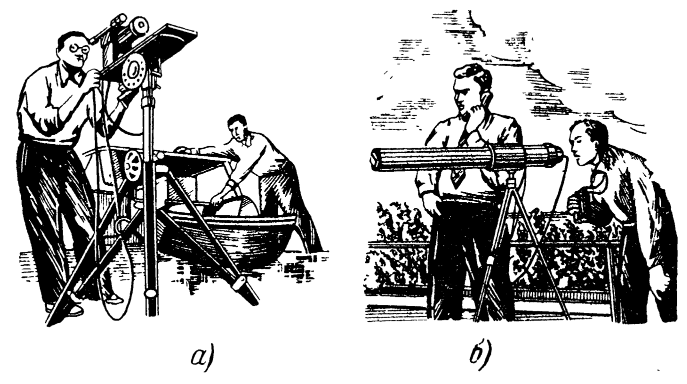
Рис. 10. Схема электрооптического модулятора с ячейкой Поккельса.

зера проходит через ЭОМ — кристалл АДР (или КДР). Такой ЭОМ выполняется в виде плоского конденсатора, к металлическим обкладкам которого прикладывается переменное напряжение, поворачивающее векторы электрического и магнитного полей излучения в соответствии с интенсивностью передаваемых сигналов Далее лазерное излучение проходит через анализатор — оптический фильтр, степень прозрачности которого для поступающего лазерного излучения зависит от угла поворота этих векторов от их первоначального положения. Поэтому на выходе анализатора излучение газового лазера оказывается промодулированным по интенсивности в соответствии с передаваемым сигналом. В настоящее время уже существуют ЭОМ, позволяющие работать с частотой модуляции до 1 000 *Мгц*, а при использовании некоторых дополнительных устройств — до 1 *Ггц*. В нашей стране начато производство ЭОМ с полосой пропускания 0—10 *Мгц* (МП-3) и с полосой пропускания 0—100 *Мгц* (МШ-100).

Если в передающей станции ЛЛС для повышения эффективности передатчика устанавливается полупроводниковый лазер, то его выгоднее использовать в импульсном режиме, при котором у этих лазеров достигаются более высокий к. п. д. и наибольшая выходная мощность. Помимо этого при работе ПКГ в импульсном режиме не требуется применения глубокого охлаждения лазерного диода. Для передачи информации с помощью полупроводникового лазера применяются методы внутренней модуляции излучения. Наиболее эффективными методами импульсной модуляции ПКГ являются фазово-импульсная и импульсно-кодовая модуляции, применение которых при той же средней мощности излучения лазера позволяет увеличить дальность связи в 2—2,5 раза.

Антенная система приемной станции связи обычно представляет собой оптический телескоп с входным диаметром до 500 *мм*. Для выделения излучения лазера передающей станции из имеющегося светового фона и увеличения помехоустойчивости ЛЛС в приемном канале после телескопа устанавливается узкополосный интерференционный светофильтр (ИСФ), пропускающий излучение только в пределах той узкой области спектра, где находится излучение лазера. Полоса пропускания такого фильтра обычно не превышает нескольких тысячных микрометра.

Приемник ЛЛС обычно представляет собой приемник прямого усиления с детектором в виде фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) или фотодиода (ФД), выполняющими также роль демодуляторов принимаемых сигналов. Принцип действия этих фотодетекторов основан на преобразовании световой энергии в электрическую вследствие наличия внешнего (ФЭУ) или внутреннего (ФД) фотоэффекта. Чаще всего в качестве фотодетектора в ЛЛС применяется ФЭУ. Фотокатод ФЭУ под действием падающего на него излучения лазера



а) б)

Рис. 11. Аппаратура лазерной линии связи.

испускает фотоэлектроны, которые затем умножаются в динодной системе прибора, усиливающей фототок сигнала. ФЭУ обладают высоким коэффициентом усиления (10^5—10^6) и характеризуются низким уровнем собственных шумов. Они позволяют детектировать оптические сигналы, модулированные частотами до 250 *Мгц*. Диапазон спектральной чувствительности существующих фотокатодов ФЭУ в ближней инфракрасной области спектра простирается до 1,2 *мкм*. В видимом и ближнем инфракрасном участках спектра ФЭУ обладают наиболее высокой чувствительностью по сравнению с другими типами фотодетекторов. В системах оптической связи с широкополосной модуляцией применяются ФЭУ бегущей волны, обладающие еще более широкими полосами пропускания. Необходимо заметить, что высокие информационные возможности лазерных линий связи в настоящее время не могут быть полностью реализованы из-за отсутствия соответствующих широкополосных модуляторов и фотоприемников, поэтому работам над созданием этих устройств придается

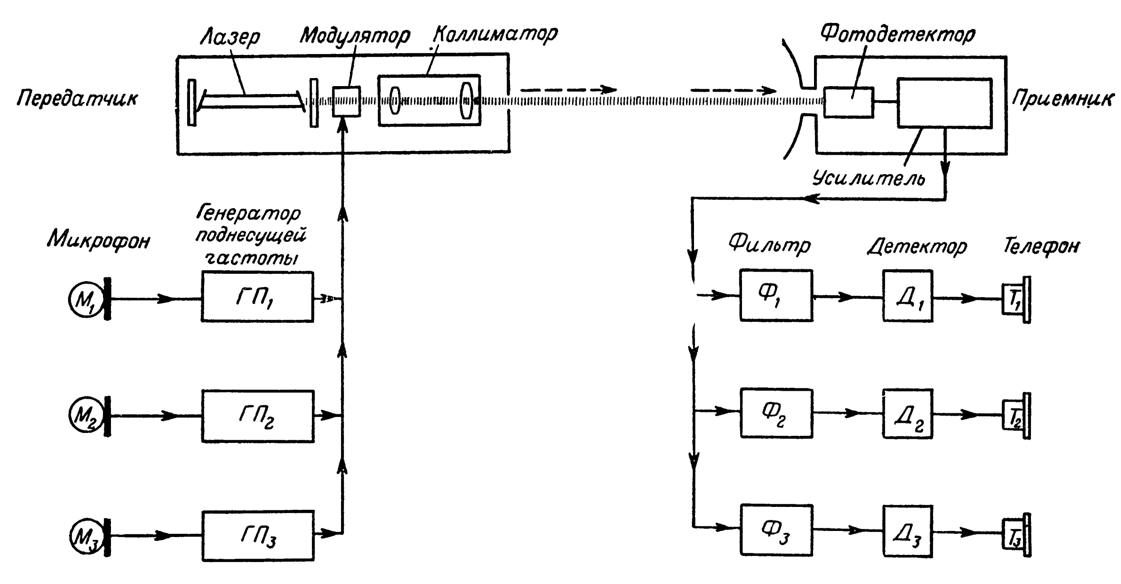


Рис. 12. Упрощенная схема многоканальной лазерной линии связи.

большое значение. На рис. 11 изображена передающая (*а*) и приемная (*б*) аппаратура лазерной линии связи.

На рис. 12 приведена упрощенная схема одной из возможных систем многоканальной лазерной линии телефонной связи. Низкочастотный сигнал каждого телефонного канала, поступающий с выхода микрофона (от абонента), модулирует свою поднесущую частоту. Поднесущие частоты, промодулированные речевыми сигналами (телефонными разговорами), поступают затем на ЭОМ для модуляции излучения газового ОКГ передатчика. На приемной станции для разделения каналов связи после фотодетектора установлены электрические фильтры, каждый из которых настроен на одну из поднесущих частот и поэтому выделяет один определенный телефонный канал. Для выделения низкочастотного сигнала, несущего информацию, в каждом канале после фильтра установлен детектор, с выхода которого низкочастотный сигнал поступает в телефон к абоненту.

Особенностью работы открытых ЛЛС в приземных слоях атмосферы является влияние состояния атмосферы и метеорологических условий на трассе на распространение лазерного излучения. Поэтому при проектировании таких линий необходимо учитывать особенности распространения в атмосфере излучений оптического и ближнего инфракрасного диапазонов волн, в которых лежат частоты излучения существующих ОКГ, пригодных для применения в ЛЛС. Различные газы и мельчайшие твердые и жидкие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в атмосфере, ухудшают ее оптические свойства и вызывают поглощение и рассеивание проходящего через нее лазерного излучения Прозрачность атмосферы значительно ухудшается при дожде, туманах и снегопадах, которые могут существенно уменьшить дальность действий ЛЛС и даже нарушить ее работу. Количество дней с сильными дождями, туманами и снегопадами в течение года зависит от места размещения ЛЛС, времени года и суток. В Москве, например, в течение года в среднем бывает всего 70—80 *ч* плотного тумана. Влияние туманов на работу открытой ЛЛС может быть значительно уменьшено размещением приемной и передающей станций на высоте 60—100 *м* над землей.

Многие районы нашей страны, особенно на юге, обладают хорошими метеорологическими условиями для создания там линий лазерной связи. Кроме того, в ряде случаев не требуется непрерывная работа линии связи, так что открытая ЛЛС может передавать большие объемы информации в относительно короткие промежутки времени, когда устанавливаются благоприятные погодные условия.

Возможности применения лазеров в открытых линиях связи исследованы еще далеко не полностью. Вследствие избирательного поглощения различных длин волн в атмосфере существуют так называемые «окна прозрачности». Наиболее сильно эти «окна» выражены в диапазонах волн 0,3—0,75 *мкм* и 8—12 *мкм*, коэффициент пропускания которых в атмосфере лежит в пределах от 0,6 до 0,9. Поэтому надежность работы открытых ЛЛС может быть повышена применением в них лазеров, излучающих в каком-либо из этих «окон». В настоящее время специально для этой цели уже создаются такие лазеры, длина волн излучения которых лежит в одном из этих «окон прозрачности». К таким ОКГ относится, например, лазер на углекислом газе, излучающий на волне 10,6 *мкм*. Другим способом расширения возможностей ЛЛС является применение в них более мощных лазеров,

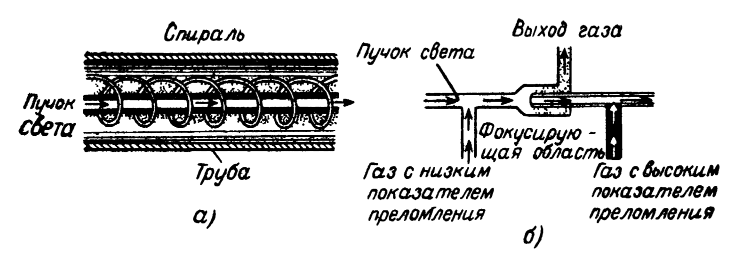


Рис. 13. Устройство газовой линзы.

Всепогодность наземных ЛЛС может быть обеспечена путем создания закрытых лазерных линий связи, в которых лазерное излучение передается по световодам, проложенным под землей. Одним из возможных вариантов такого световода является труба с расположенными внутри нее так называемыми газовыми линзами (рис. 13) — небольшими отсеками, заполненными соответствующим образом разогретым газом (*а*) или смесью газов с различными показателями преломления (*б*), искривляющими путем изменения показателя преломления среды ход лазерного луча. Применяя такие газовые линзы, представляется возможным периодически сужать расходящийся луч лазера, изгибать его и передавать на значительные расстояния с малыми потерями.

Большие перспективы имеет применение ЛЛС в космосе для связи с космическими кораблями и орбитальными станциями или для межпланетной связи. О космических ЛЛС рассказывается в гл. 6.

В последние годы в советской и зарубежной печати начали появляться сообщения о создании экспериментальных ЛЛС с применением лазеров различных типов. В нашей стране первая открытая наземная ЛЛС начала работать в Ленинграде в ноябре 1964 г. Ее протяженность составляла 6,1 *км* и по ней передавались телефонные разговоры и телевизионные изображения. В 1966 г. начала работать двусторонняя ЛЛС в Москве на пятикилометровой трассе между одной из башен здания МГУ на Ленинских горах и вышкой АТС на Зубовской площади. Здесь велись исследования по созданию многоканальной ЛЛС между телефонными подстанциями Г-6 и АВ-9. Часть каналов этих АТС была подключена к специальной аппаратуре ввода информации, преобразующей телефонные сигналы в импульсы, накладываемые при помощи ЭОМ на излучение непрерывного газового лазера, генерирующего красный свет. Излучение лазера на другом конце трассы поступало на небольшой параболический рефлектор приемной станции, а с него через небольшое фокусирующее зеркало и светофильтр, отсекающий дневной свет, на вход фотопреобразователя, выход которого через аппаратуру обратного преобразования принятых сигналов соединялся опять с АТС. В Армении была введена в опытную эксплуатацию экспериментальная стационарная ЛЛС для связи Еревана с Бюроканом. Опытная эксплуатация ЛЛС показала их хорошее качество и удовлетворительную надежность при работе в дневных и ночных условиях.

Эксперименты по применению лазеров в системе многоканальной телефонной городской связи имеют большое значение. Город-

ские каналы телефонной связи очень перегружены. Особенно это относится к организации телефонной связи с новыми районами. Многоканальные открытые ЛЛС могут, очевидно, помочь решить эту проблему достаточно просто и оперативно.

Другим возможным применением ЛЛС является телевидение. На рис. 14 изображена структурная схема лазерной телевизионной линии связи. Внешний вид телевизионной лазерной линии связи изображен на рис. 15. В павильоне «Электроника» на ВДНХ в Москве демонстрировалась опытная действующая телевизионная ЛЛС на серийно выпускаемом газовом лазере типа ЛГ-24М. Его луч переда-

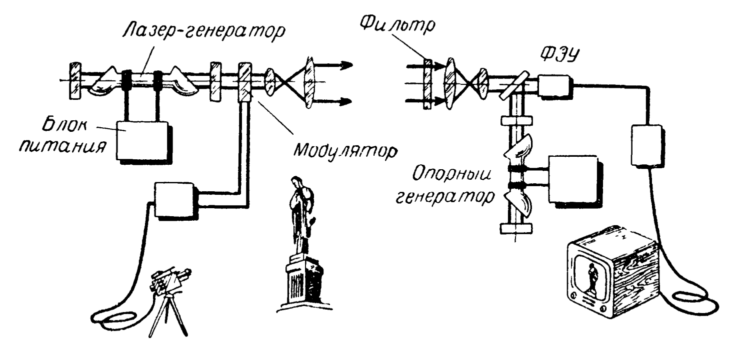


Рис. 14. Структурная схема лазерной телевизионной линии связи.

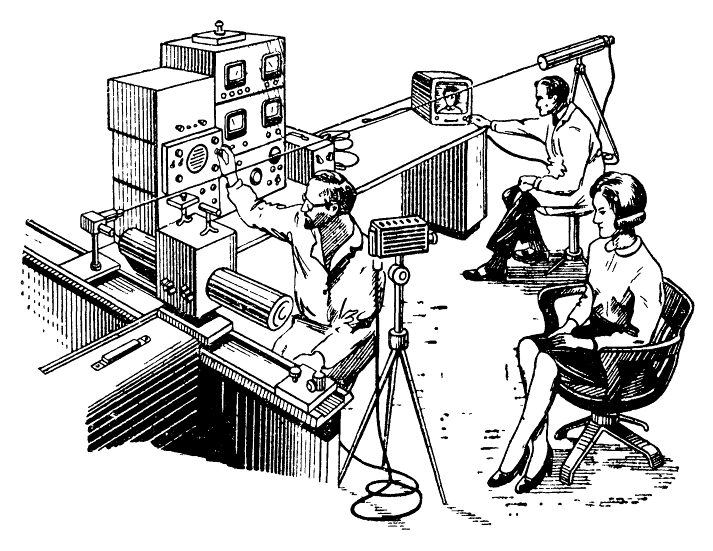


Рис. 15. Внешний вид телевизионной системы, использующей газовый лазер.

вал на установленный в другом конце зала фотоприемник, связанный с обычным телевизором, одну телевизионную программу. Посетители выставки могли в этом павильоне увидеть на телеэкране свое изображение, переданное лазерным лучом. Эта ЛЛС способна передавать телевизионное изображение на расстояния до 5 *км*. В Тбилиси в 1971 г. проводились опыты по передаче с помощью лазерного луча телевизионного изображения из Тбилисской телестудии на гору Мтацминда, где установлена телевизионная башня телецентра. Передаваемое изображение было «выпущено в эфир», и его смотрели телезрители Грузии. Применение лазерного луча в телевидении позволит обойтись без кабеля, связывающего в настоящее время телестудию и телецентр, и передавать информацию из студии лучом непосредственно в радиопередатчик телецентра, посылающего передачу в эфир.

За рубежом в последние годы также опубликован ряд сообщений об экспериментах с телефонными и телевизионными ЛЛС, проводимыми в учебных институтах и лабораториях различных фирм. В этих опытах применялись как непрерывные газовые лазеры, так и ПКГ на арсениде галлия.

Глава четвертая

ЛАЗЕРЫ В ГЕОДЕЗИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Возможность создания на основе лазеров приборов для определения с высокой точностью положения различных подвижных и неподвижных объектов позволяет применить лазеры для решения таких геодезических задач, как измерение расстояний и деформаций, нивелирование (определение разности высот) и т. п. Применение лазеров в геодезических приборах позволяет не только значительно повысить точность этих приборов, но и увеличить дальность их действия, повысить производительность труда геодезистов, автоматизировать геодезический контроль в процессе строительства. Точность измерений лазерными геодезическими приборами настолько высока, что позволяет контролировать, например, колебания зданий при сильном ветре или колебания мостов, которые очень трудно обнаружить другими способами. Одно из возможных направлений применения лазеров в геодезии — проведение безукоризненно прямых линий (идеальных прямых эвклидовой геометрии). Это свойство лазеров может быть использовано для проведения линий на местности (горизонталей и вертикалей), при сооружении туннелей (для выверки их осевых линий), прокладке каналов, строительстве дорог и возведении различных сооружений для контроля их горизонтальности или вертикальности, т. е. везде, где необходимо выдерживать с большой точностью заданное направление.

До появления ОКГ в геодезии для измерения расстояний применялись светолокационные дальномеры (светодальномеры) с газоразрядными лампами или лампами накаливания, излучающими свет в широком спектре частот.

Для измерения расстояний в геодезических дальномерах применялись те же методы, что и в радиолокации — фазовый и импульсный. Фазовый метод, как известно, обеспечивает большую точность.

Из теории радиолокации известно, что расстояние *Д*, измеряемое фазовым дальномером, определяется по формуле

$$Д = \frac{c_а}{2n_а f_м}\left(N + \frac{\varphi}{360}\right),$$

где $c_а$ — скорость распространения света в атмосфере; $n_а$ — показатель преломления атмосферы на частоте излучения дальномера; $f_м$ — частота модуляции излучения передатчика (масштабная частота); N — целое число длин волн передатчика, укладывающихся на расстоянии $2Д$; φ — величина фазы неполной $(N+1)$-й волны на расстоянии $2Д$.

Из этой формулы следует, что для точного определения расстояния необходимо с высокой точностью знать скорость распространения света и показатель преломления атмосферы. Скорость распространения света в вакууме c_0 не зависит, как известно, от его длины волны λ. В атмосфере же показатель преломления является функцией длины волны и потому скорость распространения света в ней определяется как $c_а = c_0/n_а$ и является также функцией длины волны и состояния атмосферы (метеорологической дальности видимости). При этом чем короче длина волны световых колебаний, тем относительно медленнее они распространяются в атмосфере.

Поскольку в светодальномере используется широкополосный источник, регистрация света, отраженного от объекта, производится по суммарному воздействию его спектра на фотоприемник. При этом для вычисления дальности пользуются значением скорости распространения света в атмосфере, соответствующей длине волны максимума спектра колебаний, излучаемых источником (так называемой групповой скоростью $c_{гр} = c_0/n_{гр}$, где $n_{гр}$ — показатель преломления атмосферы на длине волны максимума спектра источника). Однако неточность в определении этой длины волны в спектре отраженного сигнала, разброс спектральной чувствительности фотокатода фотодетектора и изменение спектра отраженного сигнала при распространении в атмосфере приводят к погрешностям в определении величины $c_{гр}$, а следовательно, и измеряемого расстояния. Применение в геодезических светодальномерах в качестве источника излучения газового лазера непрерывного излучения, имеющего точно известную длину волны, позволяет исключить эту (дисперсионную) погрешность в определении групповой скорости света и тем самым значительно повысить точность измерения дальности. Так, например, относительная ошибка, обусловленная влиянием дисперсии света, составляет у отечественного геодезического светодальномера типа СВВ-1 (с газоразрядной лампой) $\pm 10^{-6}$. При установке в этом дальномере газового гелий-неонового лазера (дальномер СВВ-1М) ошибка в измерении дальности уменьшается примерно до 10^{-8} для любого времени суток.

Монохроматичность излучения лазера способствует также повышению дальности действия светодальномера по двум причинам. Лазер обеспечивает гораздо меньшую угловую расходимость излучения передатчика, а также позволяет осуществлять на входе фотоприемника спектральную селекцию полезного сигнала. Для этого перед фотодетектором устанавливается достаточно узкополосный оптический светофильтр, значительно подавляющий внешнее фоновое излучение, создаваемое солнечным светом, рассеянным атмосферой. Это особенно важно при работе дальномера в дневное время.

Применение в дальномере СВВ-1М гелий-неонового лазера позволило довести дальность действия его в любое время суток до 20 *км*, в то время как дальность действия дальномера СВВ-1 днем не превышала 5 *км*.

В другом отечественном геофизическом фазовом лазерном дальномере ГД-314 с полупроводниковым лазером на арсениде галлия,

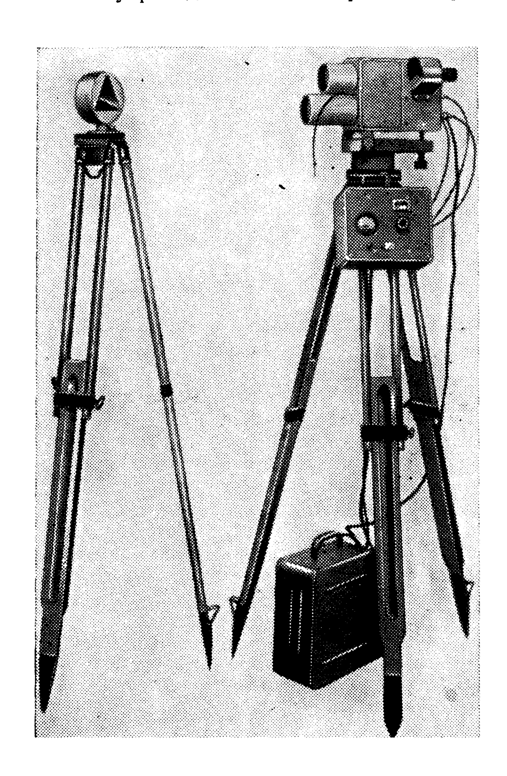


Рис. 16. Отечественный квантовый дальномер ГД-314 с призменным искусственным отражателем лазерного излучения.

излучающим на волне 0,860 *мкм* (рис. 16), используются для грубого и точного измерения дальности две масштабные частоты. В диапазоне дальностей до 2 000 *м* этот дальномер выполняет измерения с точностью в пределах ±2 *см*. Приемопередающий блок дальномера имеет массу 6 *кг*, измерительный блок — 5 *кг*. Масса прибора с блоком питания на сухих батареях — 15 *кг*. Батареи обеспечивают непрерывную работу прибора в течение 50 *ч*. Полупроводниковый лазер в этом дальномере работает без принудительного охлаждения. При проведении геодезических работ дальномер ГД-314 использует-

ся совместно с искусственным отражателем призменного типа, изображенным на рис. 16.

В геодезическом лазерном дальномере КДГ-2 (рис. 17) применен полупроводниковый ОКГ, работающий в некогерентном (спонтанном) режиме излучения. Применение некогерентного режима работы лазера позволило уменьшить вес, габариты и мощность питания.

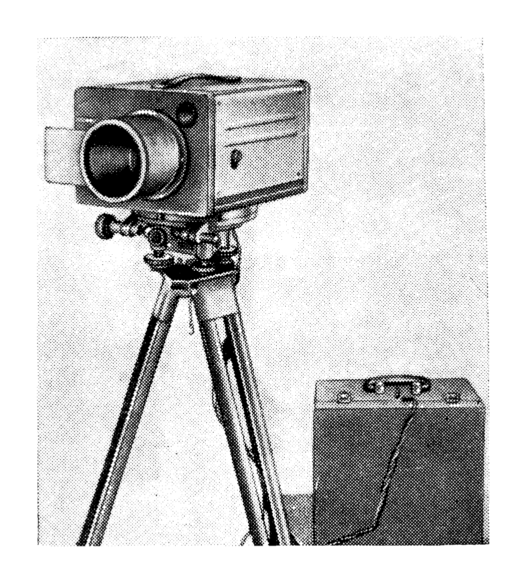


Рис. 17. Геодезический квантовый дальномер КДГ-2.

КДГ-2 обладает дальностью действия от 20 до 1 500 *м*, точностью измерения дальности ±3 *см*. Прибор потребляет 3 *вт* и имеет массу 8 *кг*. Используется он также вместе с призменным отражателем. Электрическая схема этого дальномера выполнена на полупроводниковых приборах.

В дальномере КДГ-3 (рис. 18) в качестве источника излучения также применен полупроводниковый лазер из арсенида галлия, работающий в спонтанном режиме излучения. Дальномер КДГ-3 предназначен для измерения расстояний до отражающего устройства (призменного типа) от 20 до 1 200 *м* со средне-квадратичной ошибкой, равной ±(2—5) *см*. Масса прибора — 11 *кг*, потребляемая мощность 3—5 *вт*.

Применение геодезических лазерных дальномеров в различных строительно-монтажных работах дает большие преимущества. Так, например, с их помощью удается в несколько раз сократить сроки монтажа при прокладке новых линий электропередачи. Использование лазерных дальномеров для измерения расстояний между центрами опор обеспечивает такую точность, которая позволяет выполнять все подготовительные операции по подвеске проводов непосредствен-

но на земле. Практика показала, что этот метод себя вполне оправдывает.

Другой важной задачей лазерной геодезии является определение деформаций сооружений. Для этих измерений могут применяться прецизионные геодезические лазерные дальномеры или другие лазерные приборы, действие которых основано на использовании эффекта Допплера. При деформации сооружения происходит или относительное смещение (сдвиг) его частей или сдвиг всего сооружения целиком. При применении газовых ОКГ с высокой стабильностью частоты излучения (до 10^{-9}) имеется возможность, используя эффект Допплера, определять скорость смещения части сооружения (его деформацию). На рис. 19 приведена принципиальная схема такой лазерной установки. Для проведения измерений на исследуемой части сооружения (в точке *2*) устанавливается зеркальный отражатель, на который направляется луч газового лазера, размещенного в точке *1* на расстоянии d. Отраженный луч возвращается в точку *1* и попадает в фотоприемник. Некоторая часть излучения лазера направляется системой зеркал непосредственно на вход фотоприемника и служит в нем опорным сигналом. При перемещении части сооружения с закрепленным на ней отражателем относительно точки *1* со скоростью v в отраженном сигнале возникает допплеровский сдвиг частоты, в результате чего на выходе фотоприемника образовываются биения частот отраженного и опорного сигналов лазера с составляющими допплеровского сдвига частоты $\Delta f_{д}$, определяемого выражением

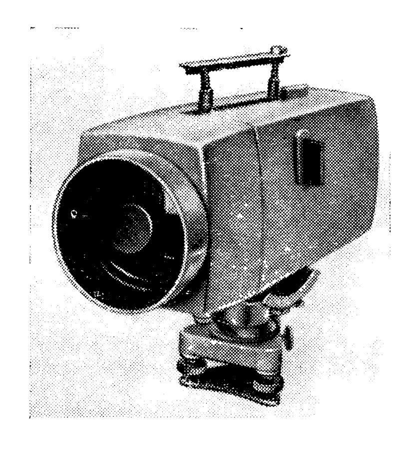


Рис. 18. Геодезический квантовый дальномер КДГ-3.

$$\Delta f_{д} = v/\lambda,$$

где λ — длина волны излучения лазера. Однако при малых скоростях перемещения допплеровский сдвиг частоты, возникающий за один полный проход луча, является настолько малым, что его не представляется возможным выделить из уходов собственной частоты лазера. Расчеты показывают, что при

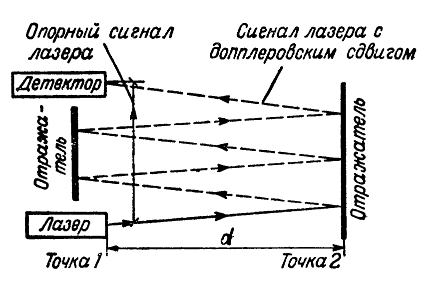


Рис. 19. Принципиальная схема измерения деформации сооружений с помощью эффекта Допплера.

скорости перемещения сооружения, например, 20 *мм* в год и длине волны излучения лазера 0,6328 *мкм* допплеровский сдвиг частоты за один проход луча составляет примерно 1/400 *гц*. Для облегчения измерений допплеровский сдвиг частоты увеличивают, применяя многократное прохождение луча лазера в прямом и обратном направлениях между точками *1* и *2*. Для этого в точке *1* устанавливается также зеркальный отражатель. В этом случае допплеровский сдвиг частоты на выходе фотоприемника составляет:

$$\Delta f_д = Nv/\lambda,$$

где N — число проходов луча между точками *1* и *2*. Возможное число проходов зависит от мощности излучения лазера и затухания его излучения в атмосфере. В случае многократного прохождения излучения можно довести величину $\Delta f_д$ до долей герц — величины, уже уверенно определяемой измерительной аппаратурой, установленной после фотоприемника.

При помощи лазерного интерферометра были обнаружены периодические изменения формы Земли с амплитудой около 5×10^{-8} $R_з$ (где $R_з$ — радиус Земли), возникающие каждые 12 *ч*. Эти деформации, как полагают ученые, являются следствием приливов, возникающих под влиянием Солнца и Луны.

Газовые лазеры непрерывного действия нашли также применение в сейсмографах, приборах для исследования колебаний, возникающих в земной коре. В этих приборах используется свойство лазера изменять частоту излучаемых колебаний при изменении длины резонатора. Чувствительность лазерного сейсмографа примерно на порядок выше, чем у сейсмографов других типов. Лазерный сейсмограф маятникового типа (рис. 20) состоит из двух одинаковых газовых лазеров *3* и *4*, излучающих на частоте f. Зеркала резонаторов *1* и *6* соединены друг с другом и с колеблющимся маятником *2*, подвешенным на пружине. Другие два зеркала оптических резонаторов закреплены неподвижно. При колебаниях маятника *2* длина резонатора одного лазера увеличивается, а другого — уменьшается, что приводит к изменению частот излучения лазеров до значений f_1 и f_2. В оптическом смесителе *5* происходит выделение разностной частоты $(f_1—f_2)$, величина которой зависит от амплитуды колебаний маятника.

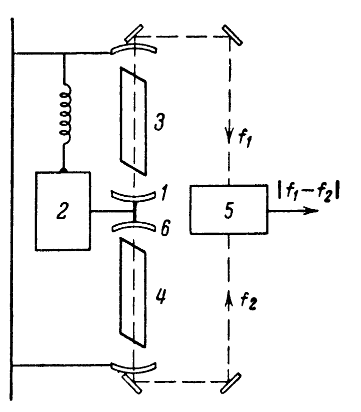


Рис. 20. Принципиальная схема лазерного маятникового сейсмографа.

Лазеры вносят много нового и в технику геодезических измерений. Высоконаправленный яркий луч газового ОКГ является идеальной прямой линией, заменяющей строителям линейку и отвес при производстве строительно-монтажных работ. По лазерному лучу, например, выверяются теперь вертикальность опорных точек при

строительстве дымовых труб, высотных зданий, радио- и телевизионных башен, различных вышек, шахтных сооружений, а также осуществляется оперативный геодезический контроль за сооружениями такого типа.

Для образования вертикальной опорной линии предназначен отечественный лазерный зенит-центрир ЛЗЦ-1. Источником света в этоме приборе служит гелий-неоновый лазер марки ОКГ-14, установленный вертикально на подставке от двухсекундного триангуляционного теодолита. Вертикальное положение направления излучения лазера задается высокоточным уровнем. Мощность излучения ОКГ-14 составляет 3 *мвт*, расходимость луча на выходе прибора (после телескопа) — 30″. Прибор может применяться для проектирования вертикалей как вверх, так и вниз. Прибор ЛЗЦ-1 применялся, в частности, при строительстве телевизионной башни Московского телецентра в Останкино для проверки вертикальности башни. Измерения проводились ночью в тихую погоду, так как днем вследствие одностороннего нагрева башни солнцем и при ветре ее вертикальность несколько нарушалась. При строительстве шахтных стволов, для контроля установки башенных копров и других работах используется возможность ЛЗЦ-1 проектировать вертикаль вниз.

Для выверки осевых линий туннелей и других подобных сооружений, требующих прокладки безукоризненно прямых линий на местности, в нашей стране создан лазерный визир ЛВ-1 с газовым гелий-неоновым лазером типа ОКГ-13. Мощность лазера 0,4—1,0 *мвт*, угловая расходимость луча после телескопа 30″. Дальность действия визира ЛВ-1 составляют 200 *м*, а точность определения координат на предельном расстоянии — ±4 *мм*. При проходке туннеля лазерный визир устанавливается в начальной точке трассы и луч лазера направляется вдоль оси будущего туннеля на экран (представляющий собой мозаику фотоэлектрических элементов), который устанавливается на проходческом щите. Положение щита контролируется оператором по положению пятна, создаваемого лучом визира на экране. Возникающие при этом на выходе фотоэлементов сигналы соответствуют координатам лазерного пятна на экране. Они поступают на пульт управления щитом к оператору, но могут быть использованы и для автоматического управления щитом. Испытания лазерного визира показали, что он обеспечивает необходимую точность контроля за положением щита, а сама система контроля является простой и удобной в эксплуатации.

При различных геодезических работах на местности успешно применяется и другой отечественный лазерный визир ЛВ-2 с гелий-неоновым лазером ОКГ-11 мощностью 2 *мвт*; ЛВ-2 имеет дальность действия до 500 *м* и определяет координаты объекта с точностью ±1,0 *см*. Лазерный луч на выходе прибора имеет ширину 30″. Горизонтальность луча контролируется уровнем. Прибор может поворачиваться по азимуту и углу места при помощи микрометрических винтов. При проведении измерений прибор устанавливается в начальной точке трассы и его луч наводится на ее конечную точку для проведения тригонометрического нивелирования и разбивки створа трассы. Этот лазерный визир применялся, в частности, при разбивке трассы длиной 700 *м* для установки ленточных конвейеров роторных экскаваторов на Михайловском карьере Курской магнитной аномалии. Для сравнения было проведено геометрическое нивелирование этого же участка трассы обычным нивелиром НВ-1, которое показало, что лазерный прибор обладает не меньшей точностью и при этом

существенно упрощает проведение измерений. В обоих случаях средне-квадратичная ошибка измерений лежала в пределах ±9 *мм*.

Лазерный визир использовался для контроля горизонтальности укладки плит при сооружении могилы Неизвестного солдата у Кремлевской стены в Москве. Подобные визиры применялись также для геодезической съемки подкрановых путей мостовых кранов. Такая работа была проведена на Ворошиловоградской ГРЭС с помощью прибора ЛВ-1. Луч лазера этого прибора направлялся вдоль подкранового рельса длиной 280 *м* и служил базисной линией. Съемка с помощью ЛВ-1 была выполнена двумя геодезистами за 4 *ч*. Контрольная съемка подкрановых путей при помощи обычного теодолита заняла у этих же геодезистов 12 *ч*.

Перспективным является также применение газовых ОКГ непрерывного излучения для осуществления оперативного геодезического контроля при проведении строительных работ. Лазеры позволяют значительно упростить такой контроль, сделать его непрерывным, выдержать заданные допуски. При разработке соответствующих лазерных приборов открывается возможность автоматизировать операцию контроля. В настоящее время уже проводятся эксперименты по применению лазеров в подобных системах. Для этого на рабочем органе исполнительного механизма машины (например, путерихтовочной машины, землеройной машины) устанавливается фотоприемник, на который направляется модулированный луч лазера. Сигналы с выхода фотоприемника поступают в систему управления машиной, удерживая ее исполнительный механизм в заданных лучом положении и направлении. Подобные системы являются наиболее приемлемыми и достаточно простыми.

Перечисленные в этой главе направления применения лазеров в геодезии и строительстве далеко не исчерпывают все потенциальные возможности ОКГ в этих областях. Несомненно, что круг задач, которые могут быть решены с помощью лазеров, будет расширяться и они во многом облегчат труд строителей и геодезистов.

Глава пятая
ЛАЗЕРЫ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Активными потребителями аппаратуры на лазерах в последние годы становятся медицина и биология. Лазеры в этих областях заняли уже довольно прочные позиции, и возможности их применения все время расширяются.

Острая фокусировка лазерного луча, приводящая к созданию пятна чрезвычайно малого диаметра, позволяет использовать этот луч как тонкий инструмент для проведения ювелирных операций и осуществления его воздействия на отдельные клетки тканей живых организмов.

В нашей стране и за рубежом проводятся работы по изучению биологического эффекта лазерного излучения на различные живые ткани. Получены интересные данные о результатах воздействия лазерного излучения на глаза, кожу, зубы, ряд внутренних органов, головной мозг, кровь, кровеносные сосуды, злокачественные опухоли. Установлено, что биологическое воздействие излучения лазера на живую ткань зависит от его мощности и режима работы. При

применении лазеров, работающих в непрерывном режиме излучения, имеет место главным образом тепловое воздействие луча на ткань. Под влиянием нанесенного ожога в ткани наблюдается коагуляция (свертывание) крови и закупоривание сосудов тромбами (сгустками) крови. Под воздействием импульсного излучения с энергией в импульсе до 10^3 *дж* при длительности импульсов от 10^{-2} до 10^{-8} *сек* взаимодействие лазерного излучения с живой тканью носит взрывной характер. В результате такого взаимодействия лазерный луч пробивает, сваривает, выжигает и испаряет кости и мягкие ткани живого организма. Полученные результаты говорят о том, что применение лазеров в таких отраслях медицины и биологии, как офтальмология, хирургия, онкология, биохимия, генетика, молекулярная биология и др., является очень многообещающим.

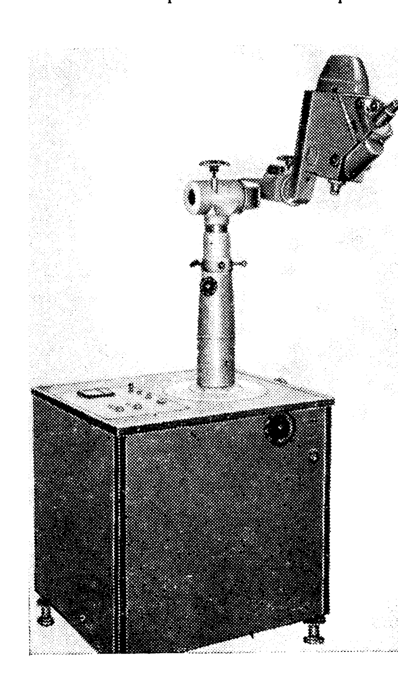


Рис. 21. Квантовый офтальмокоагулятор ОК-1.

В клинической практике уже нескольких лет врачи успешно применяют лазеры для лечения ряда тяжелых заболеваний глаз. Здесь, как и в технике, первыми начали использоваться импульсные рубиновые ОКГ. В офтальмологическом институте им. В. П. Филатова в Одессе впервые в нашей стране лазеры были применены для лечения глаз. Сотрудниками этого института совместно с учеными Московского НИИ глазных болезней имени Гельмгольца и конструкторами оптической промышленности был создан квантовый офтальмокоагулятор ОК-1 (рис. 21). Большое число этих приборов уже поступило в глазные клиники нашей страны. С помощью прибора ОК-1 выполняется безоперационное лечение отслоения сетчатки глаза, удаляется катаракта, выжигаются глазные опухоли и даже делается искусственный зрачок. Прибор выполняет операцию так быстро, что отпадает необходимость в наркозе, так как пациент даже не успевает почувствовать боли: наложение шва на сетчатку занимает, например, всего 10 *мсек*.

В приборе ОК-1 источником излучения служит рубиновый лазер с водяным охлаждением. В одну минуту лазер может давать до десяти импульсов длительностью по 1 *мсек*, энергия излучения в импульсе может изменяться от 0,1 до 1,0 *дж*. Минимальный диаметр светового пятна прибора 100 *мкм*. На рис. 22 изображен момент проведения глазной операции с помощью прибора ОК-1.

Многочисленные эксперименты подтвердили перспективность

применения сфокусированного луча лазера непрерывного излучения (мощностью до 100 *вт*) в качестве чрезвычайно острого «светового скальпеля», с помощью которого на таких важнейших внутренних органах, как сердце, печень и селезенка, можно осуществлять практически бескровные операции. При операции «световым скальпелем» происходит как бы «заваривание» всех капиллярных кровеносных сосудов в разрезаемых тканях. Это особенно важно для больных с пониженной свертываемостью крови. Другой важной особенностью лазерной хирургии является полная стерильность операции, так как при воздействии лазерного луча отсутствует непосредственный контакт хирургического (механического) инструмента с живой тканью.

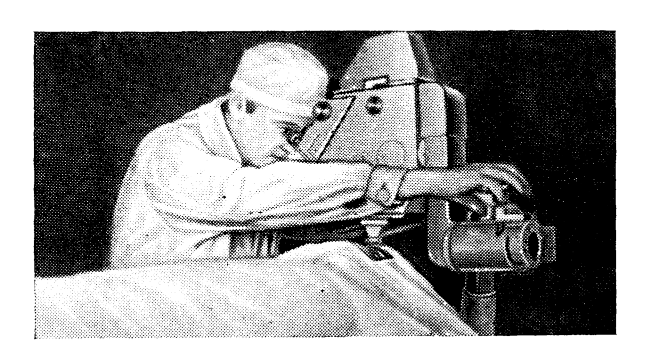


Рис. 22. Операция, проводимая квантовым офтальмокоагулятором ОК-1 на глазу человека.

На рис. 23 приведена принципиальная схема построения лазерной хирургической установки. Основной ее частью является лазерная пушка. Луч лазера проходит через зеркало $З_1$. Отражается зеркалом $З_2$ и фокусируется линзой $Л_4$ на оперируемое место. Свет от лампочки в источнике подсветки *П* отражается зеркалами $З_1$ и $З_2$ и фокусируется на оперируемое место линзой $Л_4$ в ту же точку, что и лазерный луч. Световое пятно от источника подсветки и результат воздействия излучения лазера на оперируемое место наблюдаются оператором через оптическую систему наблюдения *Н*. Фокусировка лазерного луча в нужную точку на оперируемом органе производится по световому пятну от источника подсветки *П*.

В нашей стране для выяснения возможностей лазерной хирургии был разработан медицинский прибор ОКГ-М. В нем применен газовый лазер непрерывного излучения инфракрасного диапазона волн с выходной мощностью 10 *вт*. Прибор обеспечивает фокусировку луча до диаметра 0,7—0,75 *мм*. Наведение луча на оперируемое место выполняется с помощью системы шарниров с встроенными в них зеркалами. Операционное поле прибора имеет размер 200×200 *мм* Для облегчения работы с ОКГ-М в систему наведения лазерного луча вводится свет от обычной лампочки накаливания. Этот свет вместе с излучением лазера фокусируется на оперируемом объекте Прибор в течение двух лет проходил экспериментальную проверку

в Московском научно-исследовательском онкологическом институте имени Герцена. Изучалось биологическое воздействие излучения лазера на живые ткани, поверхностно расположенные злокачественные опухоли, проверялись возможности применения лазеров для хирургических операций. В настоящее время Ленинградским оптико-механическим объединением и учеными Государственного оптического института проводится совместная работа по созданию образца «светового скальпеля» для серийного производства и подготавливается промышленный выпуск подобных приборов.

Весьма перспективным является применение лазеров для прижигания ран и остановки кровотечений, обработки кожных новооб-

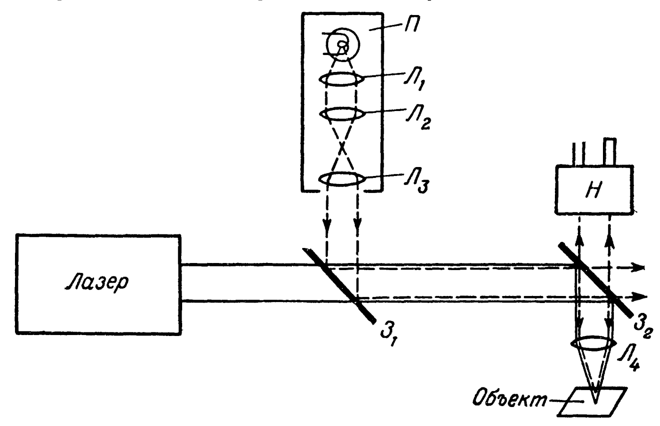


Рис. 23. Принципиальная схема построения лазерной медицинской установки.

$З_1$ — зеркало, полностью пропускающее излучение лазера и отражающее остальной свет; *П*—источник параллельной подсветки; $З_2$—дихроичное зеркало, полностью отражающее излучение лазера и частично отражающее и пропускающее излучение источника параллельной подсветки; $Л_1$—$Л_4$ — фокусирующие линзы; *Н* — система наблюдения.

разований и повреждений. Получены положительные результаты при применении импульсных лазеров с энергией излучения до 200 *дж* для соединения небольших кровеносных сосудов без остановки тока крови.

Многочисленные эксперименты по изучению воздействия лазерного излучения на всевозможные опухоли, проведенные в разных странах, позволили выявить ряд злокачественных и доброкачественных опухолей, поддающихся лечению при воздействии на них излучения импульсных лазеров. Это в основном опухоли, расположенные на поверхности кожи, типа меланомы, имеющие темный цвет и хорошо поглощающие лазерное излучение. Можно успешно выжигать лазерным лучом родимые пятна, татуировки и бородавки. Недавно в Институте хирургии имени А. В. Вишневского лучи лазера стали применять для ликвидации татуировок, а в Киевском институте экспериментальной и клинической онкологии открылось первое отделение лазерной терапии для лечения поверхностно расположенных опухолей.

К других возможным областям применения лазеров в медицинских целях можно отнести стоматологию, нейрохирургию, дезинфекцию небольших участков, зараженных бактериями. Американские ученые установили, например, что лазерное излучение обладает способностью разрушать пораженную кариесом зубную ткань. Лазеры могут быть применены вместо бормашины при лечении зубов: тонкий луч рубинового лазера проделывает в зубе отверстие легче, чем иголка в куске масла и при этом совершенно безболезненно.

Объединение лазера с волоконной оптикой позволяет осуществлять фотографирование труднодоступных для исследования областей организма. Можно также применить лазер в качестве мощного источника света при фотографировании и изучении сравнительно непрозрачных структур тканей тела.

В биологии применение газовых лазеров непрерывного излучения позволяет осуществить давнишнюю мечту ученых о сверхминиатюрном скальпеле для операций на микробах и отдельных клетках; скальпеле, которым генетики смогут прооперировать хромосому и аккуратно отсечь от нее один единственный ген. Установлено, что под влиянием бомбардировки фотонами происходит изменение хромосом. До появления лазеров было невозможно осуществить такую тонкую фокусировку светового излучения и приходилось облучать квантами света сразу всю хромосому. Применение лазеров позволит более осмысленно воздействовать на вполне определенные участки хромосомы. Это может дать в руки ученых средство для управления наследственностью и создания новых организмов. Работам по изучению мутаций (изменений наследственных признаков) под воздействием лазерного излучения ученые уделяют большое внимание. В Институте общей генетики АН СССР было обнаружено цитогенетическое воздействие гелий-неонового газового лазера с длиной волны излучения 0,6328 *мкм* на семена некоторых растений и установлено, что в результате воздействия лазерного излучения на хромосомы процесс мутаций идет с большей эффективностью.

Французскими учеными было обнаружено, что при облучении отдельных клеток крови сфокусированным до диаметра 2,5 *мкм* красным лучом лазера у неокрашенных клеток (белых кровяных телец) не наблюдалось никаких эффектов. Однако после окраски их зеленью, хорошо поглощающей лазерное излучение, имели место разрывы оболочек телец. Красные кровяные тельца, по-видимому, хорошо поглощали красное излучение лазера На поверхности красных кровяных телец после поглощения ими определенной дозы излучения в месте падения луча возникала обесцвеченная область с диаметром, примерно равным диаметру пятна излучения лазера на поверхности красного кровяного шарика. При увеличении мощности излучения происходило свертывание гемоглобина, и клетка погибала.

При воздействии лазерного излучения на биологические молекулы, обладающие обычно анизотропией (разными свойствами в разных направлениях), в ряде опытов наблюдалось возникновение пространственной ориентации молекул. При увеличении энергии лазерного излучения наблюдался разрыв молекулярных связей или структурная перестройка самих молекул, причем оказалось, что лазерное излучение имеет избирательное воздействие на биологические молекулы, т. е. происходит разрушение только некоторых связей. Иначе говоря, взаимодействие лазерного излучения с биологическими молекулами носит резонансный характер. Поэтому лазеры позволяют осуществлять в высшей степени избирательное воздействие на не-

которые реакции обмена веществ в организме. Лазер сможет играть роль катализатора, ускоряющего определенные реакции и его излучение, подобно ферменту, вызовет повышение эффективности этих реакций. Высказываются предположения, что при облучении биологической молекулы модулированным лазерным излучением будет возможно подобрать частоту его модуляции в соответствии с ритмом построения молекулы и с помощью такого временнóго кодирования успешно управлять молекулярными реакциями. Несомненно, что интересные результаты можно будет получить при изучении реакций фотосинтеза в зеленых растениях при непосредственном поглощении ими лазерного излучения или других видах его воздействия на растение.

Исследования общих закономерностей взаимодействия лазерного излучения с биологическими клетками показали, что существует определенная зависимость между длиной волны излучения и степенью его воздействия. Эффективность воздействия лазерного излучения возрастала при приближении его длины волны к 0,26 *мкм*. На этой длине волны более 90% излучения поглощается нуклеиновыми кислотами и менее 10% — белками (протеинами). Поэтому лазерное излучение на волне 0,26 *мкм* более действенно, чем рентгеновское и гамма-излучение. Такое излучение, по-видимому, можно будет получить у жидкостных лазеров на растворах органических красителей.

В гораздо меньшей степени исследовано биологическое воздействие лазерного излучения на живой организм в целом, что объясняется главным образом сложностью самого организма.

В ряде экспериментов при воздействии лазерного излучения на организм было обнаружено его влияние на сердечно-сосудистую и нервную систему животных· имели место изменения артериального давления, нарушения условно-рефлекторной деятельности и нейрогормональные изменения. Во многих случаях наблюдались нарушения основного обмена, при которых организм начинал потреблять значительно больше кислорода. Интересно отметить, что почти все эксперименты показали, что живой организм может приспосабливаться к воздействию лазерного излучения, а искусственные изменения функционального состояния центральной нервной системы с помощью специальных препаратов (холинолитиков) могут повышать или понижать устойчивость организма к лазерному излучению.

Глава шестая

ЛАЗЕРЫ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Запуск первого советского искусственного спутника Земли (ИСЗ) 4 октября 1957 года явился началом эры освоения человечеством космического пространства. Успехи, достигнутые в исследовании космоса, стали возможными только благодаря значительным достижениям в различных областях науки и техники. Проведение космических исследований было бы невозможно без создания сложнейшей радиоэлектронной и оптической автоматической аппаратуры, устанавливаемой на борту спутников и в наземных системах управления.

Среди других новейших видов техники важную роль в освоении космоса играет и квантовая электроника. Применение лазеров в условиях космоса имеет следующие основные особенности:

практически полное отсутствие оптически плотной среды (атмосферы), поглощающей лазерное излучение;

особая фоновая обстановка, отличающаяся от обстановки в приземном слое атмосферы.

Отсутствие в космосе поглощающей среды позволяет получить от лазерной аппаратуры при сравнительно низкой мощности излучения ОКГ и небольших размерах антенн значительно большую дальность действия, чем в земных условиях. Уровень фонового шума, попадающего в космическом пространстве на вход фотоприемника лазерной аппаратуры и ограничивающего ее дальность действия, сильно зависит от направления линии визирования оптической системы (антенны) и от степени удаленности аппаратуры от Земли или других небесных тел. Так как в космосе отсутствует среда, рассеивающая излучение Солнца, то при отсутствии Солнца, Луны или ярких звезд в поле зрения приемной оптической системы лазерной аппаратуры дальность действия ее будет значительно возрастать вследствие того, что фоновое излучение на входе фотоприемника будет создаваться только слабым светом звезд. Таким образом, для лазерной аппаратуры в космическом пространстве имеются гораздо лучшие условия работы, чем в приземном слое атмосферы.

В настоящее время уже можно наметить основные направления применения лазеров в космических исследованиях:

исследование космических тел;

слежение с Земли за различными космическими аппаратами;

космическая связь (связь типа «Земля — Космос» и «Космос — Космос»);

космическая навигация (различные виды управления космическими кораблями в космосе, в том числе операциями встречи и стыковки космических кораблей и посадкой их на планеты).

Первым космическим телом, подвергшимся исследованию с помощью лазеров, стал естественный спутник Земли — Луна. Много веков ученые пытались определить законы ее движения, но задача оказалась очень сложной (Ньютон даже говорил шутя, что у него от теории движения Луны болит голова). Удовлетворительная теория, пригодная для прогнозирования движения Луны, была создана только в конце XIX — начале XX века; но для выполнения расчетов при помощи этой теории необходимо было определить ряд параметров системы «Земля — Луна». Ограниченная точность определения этих параметров существующими способами определила и возможную точность самих расчетов. Развитие космонавтики привело к необходимости уточнения законов движения небесных тел и, в частности, Луны. Проводимая с Земли лазерная локация Луны, благодаря чрезвычайно высокой направленности лазерного излучения, дает возможность определять расстояния до различных точек лунной поверхности с точностью, по крайней мере в 10—100 раз превышающей точность любого из известных ранее способов. Такой метод астрометрических исследований позволяет получить гораздо более точную картину движения Луны вокруг общего центра масс системы «Земля — Луна», а также исследовать собственное вращение Луны. Особый интерес представляет изучение тонких деталей собственного вращения Луны, связанных с особенностями ее внутреннего строения, которое может прояснить кое-что в проблеме происхождения спутника Земли. Но для

этого на поверхности Луны необходимо установить несколько искусственных отражателей лазерного излучения.

Первые опыты по лазерной локации Луны были произведены в США и СССР в 1962—1963 г. при помощи рубиновых ОКГ импульсным методом, хорошо известным в радиолокации. Длительность импульсов лазерного излучения составляла 0,001 *сек*, что позволило определить расстояние до Луны с точностью до 150 *км*. В передатчике американского лазерного локатора (рис. 24) использовался лазер с кристаллом рубина *3* длиной 150 *мм*, возбуждавшийся светом четырех импульсных ксеноновых ламп накачки *2*, размещенных в полуэллиптическом отражателе. Излучение лазера формировалось в параллельный луч (коллимировалось) передающей оптической системой с диаметром основного зеркала *1* 30 *см*. Энергия излучения в импульсе составляла 50 *дж* при длительности импульса 0,5 *мсек*. Для повышения к. п. д. лазера кристалл рубина охлаждался до температуры жидкого азота. Луч этого лазера охватил на Луне участок поверхности диаметром менее 4 *км*. Если бы луч обычного прожектора смог достичь Луны, он осветил бы почти всю ее поверхность.

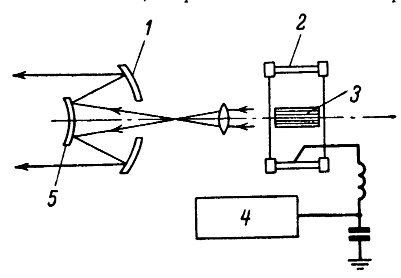


Рис. 24. Упрощенная схема передающего устройства аппаратуры, применявшейся при лазерной локации Луны.

1 — основное зеркало; *2* — импульсная лампа; *3* — рубиновый стержень; *4* — блок питания; *5* — второе зеркало.

В приемном канале американского лазерного локатора (рис. 25) была установлена оптическая приемная система Кассегрена *1*, *7* с диаметром основного зеркала *1* около 120 *см* и в качестве фотодетектора — фотоэлектронный умножитель *3*. Для уменьшения влияния внешнего фонового излучения на чувствительность фотоприемника перед фотокатодом умножителя был установлен узкополосный светофильтр *4* с максимумом пропускания на волне излучения лазера. С целью уменьшения собственных шумов приемника было применено охлаждение ФЭУ с помощью криостата *2*. Отраженный от Луны сигнал был принят наземной приемной аппаратурой через 2,5 *сек* после его излучения ОКГ.

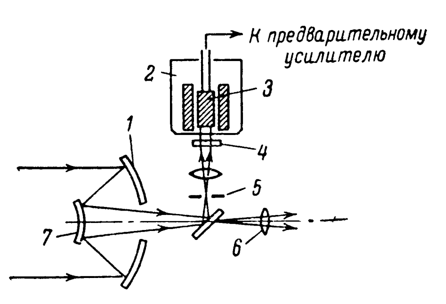


Рис. 25. Упрощенная схема приемного устройства аппаратуры, применявшейся при лазерной локации Луны

1 — основное зеркало; *2* — криостат; *3* — ФЭУ; *4* — фильтр; *5* — диафрагма, *6*—окуляр; *7*—второе зеркало.

В СССР первые опыты по лазерной локации Луны были проведены с помощью рубинового лазера, который был установлен в фокусе 2,6-метрового телескопа Крымской обсерватории — самого большого рефлектора Восточного полушария Земли. Мощные лазерные импульсы посылались в центр кратера Альбатегний на Луне и «освещали» там участок поверхности диаметром всего около двух километров. Фотоприемник с фотоэлектронным умножителем, принимавший отраженные от поверхности Луны световые импульсы, был установлен в фокусе того же телескопа Во время следующего опыта, проведенного советскими учеными в 1966 г., измерялось расстояние до дна лунного кратера Фламмарион В этом опыте использовался усовершенствованный ОКГ — лазер с модулированной добротностью, излучавший импульсы длительностью почти в одну стомиллионную долю секунды, благодаря чему ошибка измерения была уменьшена до нескольких сотен метров.

Эти первые опыты по лазерной локации Луны выявили две основные трудности. Первая трудность — значительное ослабление поступающего на вход фотоприемника отраженного от Луны сигнала: интенсивность принятого эхо-импульса оказалась в 10^{19}—10^{20} раз слабее излученного лазером. В связи с этим прием отраженных сигналов сводился к счету фотонов, которые приходилось выделять из фоновых шумов. Для получения надежных результатов во время опытов приходилось посылать лазерный луч к Луне несколько раз. Другая трудность была связана с тем, что на поверхности Луны освещалась площадка диаметром в несколько километров, обладающая естественными неровностями рельефа, которая могла иметь наклон относительно падающего на нее лазерного луча. При измерении расстояния до Луны это приводит к возникновению ошибок порядка сотен или даже тысяч метров. Научный же интерес представляет проведение измерений до Луны с точностью в несколько метров.

Оказалось, что обе эти трудности в значительной степени могут быть устранены путем размещения на лунной поверхности искусственного отражателя лазерного излучения. Такой отражатель представляет собою практически точечную поверхность, отражающую падающее на нее излучение в место его излучения на Земле. При применении искусственного отражателя ошибка в измерении расстояния до Луны определяется лишь длительностью импульса, излучаемого ОКГ, а также точностью измерения временного интервала между моментами излучения и приема лазерных импульсов. Существующие лазеры и схемы измерения временных интервалов позволяют уменьшить эту ошибку до нескольких метров, а в недалеком будущем — и до долей метра. Первый искусственный отражатель был доставлен на восточную часть лунной поверхности в море Спокойствия в 1969 г. американским космическим кораблем «Аполлон-11». При помощи этого отражателя американские ученые провели опыты по измерению расстояния до Луны.

В 1970 г советской автоматической станцией «Луна-17» был доставлен на западную часть лунной поверхности в море Дождей второй искусственный отражатель — ТЛ-2. На поверхности Луны для лазерных измерений образовалась база из двух опорных точек. Лазерный отражатель ТЛ-2 изготовлен во Франции в соответствии с советско-французским соглашением о сотрудничестве в изучении и освоении космического пространства в мирных целях. Он был установлен советскими специалистами на автоматическом аппарате «Луноход-1», с помощью которого он на Луне был сориентирован в направ-

лении на Землю. Отражатель ТЛ-2 представляет собою панель массой 3 *кг*, длиной 44 *см* и шириной 19,5 *см*, на которой расположены 14 четырехгранных призм Каждая из призм представляет собою призму с полным внутренним отражением, так что падающий на нее лазерный луч после трехкратного внутреннего отражения выходит обратно в направлении пришедшего луча. Это свойство призмы обеспечивается только в том случае, если перпендикулярность ее граней выдержана с точностью до десятых долей угловой секунды и сохра-

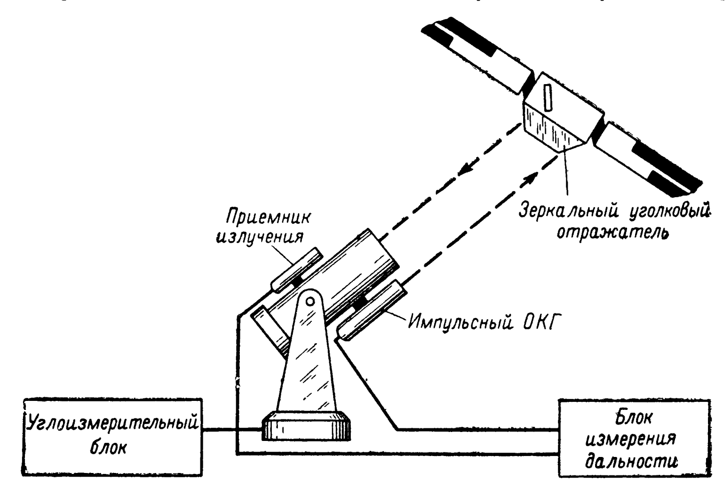


Рис. 26. Схема эксперимента по слежению за спутником S-66.

няется при работе отражателя в широком диапазоне температур окружающей среды. Поэтому изготовление этого отражателя явилось весьма сложной инженерно-физической задачей.

Локация Луны с помощью отражателя ТЛ-2 производилась двумя обсерваториями: Пик-дю-Миди на юге Франции в районе Пиренейских гор и Крымской обсерваторией. В СССР комплекс наземной лазерно-локационной аппаратуры для этого эксперимента был разработан и изготовлен в Физическом институте Академии наук СССР. В состав комплекса входил рубиновый ОКГ с модулированной добротностью, с длительностью излучаемого импульса порядка одной стомиллионной доли секунды, узкополосный фотоприемник с системой регистрации отраженного сигнала, измеритель временны́х интервалов с точностью измерения порядка одной стомиллионной доли секунды, блоки автоматики и управления В лунные ночи в Крымской обсерватории были зарегистрированы четкие отраженные сигналы от установленного на «Луноходе-1» отражателя ТЛ-2. Совместный советско-французский эксперимент по определению расстояния до Луны является новым важным этапом в использовании методов лазерной локации в космических исследованиях Так, например, некоторые американские ученые считают, что когда русские в следующий раз доставят подобный луноход на Луну, они смогут использовать лазерный комплекс наведения, который позволит ему совершать путешествия с удалением от космического корабля на расстояние до 100 миль.

Следует ожидать, что в недалеком будущем метод лазерной локации будет применяться и для изучения движения других космических тел — искусственных спутников Луны и ближайших планет.

Другой областью применения лазеров в космических исследованиях является использование их в наземных оптических системах слежения за искусственными спутниками Земли для повышения дальности действия этих систем и получения информации о параметрах орбиты спутников в любое время суток. Знание всех параметров орбит спутников необходимо ученым для получения, например, более точных сведений о распределении поля земного тяготения. До последнего времени слежение за спутниками производилось только с помощью пассивных оптических средств и только тогда, когда спутник освещен Солнцем, а наземная станция системы слежения находится в тени. При помощи таких систем могут быть определены параметры только отдельных отрезков орбиты спутника. В 1965 г. в США был проведен эксперимент по лазерному слежению за полярным ионосферным спутником S-66, запущенным на орбиту, удаленную от Земли на 1 000 *км*. На рис. 26 изображена схема этого эксперимента. На оптическом телескопе, направленном на спутник и следящем за его движением по орбите, был установлен импульсный рубиновый лазер, а на спутнике был расположен отражатель лазерного излучения на Землю в сторону станции слежения, где оно принималось фотоприемником с фотоэлектронным умножителем. Измерение расстояния проводилось обычным в радиолокации импульсным методом (рис. 27). Уголковый отражатель на спутнике (рис. 28) состоял из 360 призм сечением 2,6 *см* каждая. Передатчик был выполнен на рубиновом лазере с модулированной добротностью и коллимирующей оптической системой (рис. 29), формировавшей луч шириной около 0,05°. Модуляция добротности осуществлялась с помощью отражающей призмы *8*, приводимой во вращение электродвигателем *1* со скоростью 12 000 *об/мин* Окуляр *3* и пятигранная призма *6* предназначены для оператора, управляющего слежением за спутником. Лазер работал с частотой следования импульсов 1 *гц*. Энергия излучения в импульсе составляла 1 *дж*. Лазерная аппаратура и телескоп с диаметром зеркала в 47 *см* (рис. 30) были установлены на американском испытательном полигоне на острове Уоллопс.

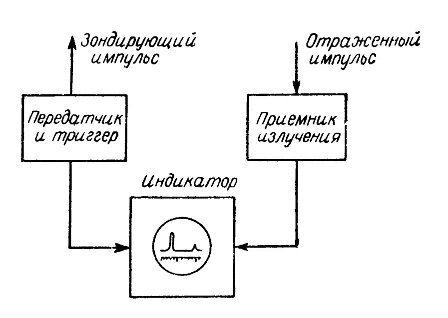


Рис. 27. Схема измерения дальности до искусственных спутников Земли при помощи ОКГ.

Приемное устройство располагалось в телескопе на месте кинокамеры. Система слежения была рассчитана на дальность действия до 1 500 *км* с расчетной точностью определения траектории спутника 30 *м*. Проведенный эксперимент позволил получить ответы на ряд вопросов, связанных с использованием лазеров для слежения за летательными аппаратами в космическом пространстве. Аналогичные ла-

зерные установки использовались американскими учеными и для проведения экспериментов по слежению за спутником «Эксплорер-22».

Во Франции в обсерватории Сан-Мишель де Прованс в 1965 г. также была проведена серия экспериментов по наблюдению за этим же американским спутником при помощи рубинового ОКГ с модулированной добротностью, имевшего длительность импульса 30 *нсек*. В моменты проведения эксперимента расстояние до спутника составляло 1 517 *км* и 992 *км*. Оно было измерено с точностью до 8 *м*. Оценивая этот эксперимент, необходимо иметь в виду огромное рас-

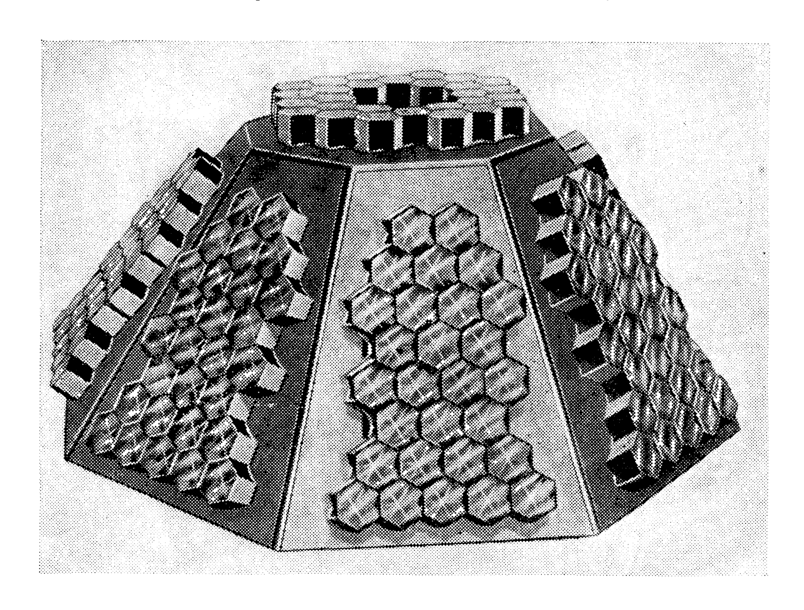


Рис. 28. Искусственный отражатель лазерного излучения, установленный на спутнике S-66.

стояние до спутника, его поистине космическую скорость движения по орбите (20 000 *км/час*) и небольшие размеры (диаметр всего 60 *см*). Один французский астроном, оценивая это достижение, в шутку заметил, что его можно сравнить с метким выстрелом в глаз мухи с расстояния пяти километров, когда муха летит со скоростью 100 *км/час*.

С развитием техники космических исследований перед учеными встала задача разработки высокоточных систем космической навигации, в частности систем для осуществления встречи и стыковки космических кораблей на орбите, для сближения космических платформ при их сборке, обеспечения посадки кораблей на другие планеты и т. п. Предполагается, что космические навигационные лазерные системы будут иметь значительно большую точность, чем аналогичные радиолокационные системы. По сообщениям иностранной печати, в США был разработан целый ряд проектов космических лазер-

ных локаторов различного назначения. По одному из таких проектов была разработана система, предназначенная для взаимного обнаружения и сближения космических кораблей в космосе с применением полупроводниковых лазеров на арсениде галлия. Согласно этому проекту один корабль («охотник») должен обнаруживать соседний корабль («цель») на расстоянии до 120 *км.* Для этого на корабле-цели устанавливаются лазерный маяк и искусственные отражатели, а также приемник излучения лазерной аппаратуры наведения, которая

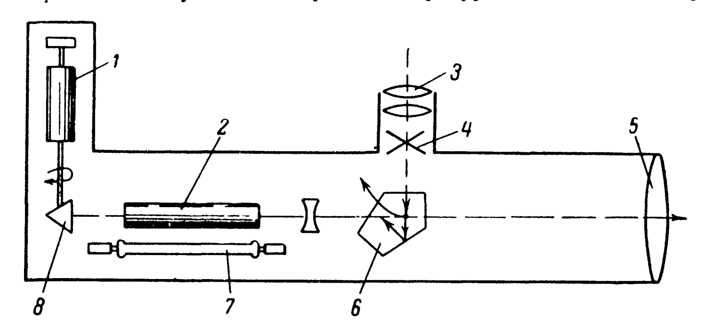


Рис. 29. Схематическое изображение лазерного передатчика, применявшегося в экспериментах с ИСЗ S-66.

1 — электродвигатель; *2* — рубиновый стержень; *3* — окуляр; *4* — перекрестие; *5* — объектив; *6* — пентапризма; *7*—лампа накачки ОКГ; *8*—вращающаяся призма модулятора добротности

находится на корабле-«охотнике». Блок-схема такой системы изображена на рис. 31. Поиск и обнаружение «цели» «охотником» производятся по установленному на «цели» лазерному маяку. Принятые сигналы маяка включают передатчик лазерного локатора на корабле-«охотнике». При сближении обоих кораблей на 14 *км* сигналы передатчика «охотника» выключают лазерный маяк на «цели» и система переходит в режим автоматического слежения. Когда расстояние между кораблями становится менее 3 *км,* на корабле-«охотнике» включается источник некогерентного излучения (также на арсениде галлия), промодулированного частотой 5 *Мгц*, что обеспечивает измерение дальности с точностью до 10 *см.* Работа системы прекращается только после причаливания одного корабля к другому. В процессе осуществления операции встречи система определяет дальность и скорость сближения обоих кораблей, а также их взаимное угловое положение О практическом применении такой системы не сообщалось.

Лазеры представляют большой интерес и для систем космической связи. Узкая спектральная полоса излучаемых лазером колебаний позволяет получить в системе связи хорошее отношение сигнал/шум. Сравнение лазерных и радиосистем связи показывает преимущество лазеров, так как они могут обеспечить гораздо более высокую скорость передачи информации при относительно небольших массе и габаритах. При исследованиях глубокого космоса канал связи должен обеспечивать передачу информации примерно со скоростью 10^6 *бит/сек.* Максимально достижимый предел пропускной способности радиосистем оценивается в 600 *бит/сек,* в то

время как для лазера мощностью 1 *вт* на линии «Земля — Луна» он составит 6×10^6 *бит/сек*. Однако трудность обнаружения излучения лазерного передатчика на фоне звездного неба, большие относительные скорости космических кораблей, наличие ложных сигналов от ярких звезд и трудность наведения тонкого лазерного луча на приемную оптическую систему осложняют установление в космосе лазерной связи типа «корабль — корабль». Эти трудности отпадают при создании лазерной связи типа «Земля — Космос» или «Земля — Луна», но в этих случаях имеет место ослабление сигналов при прохождении их через атмосферу. Кроме того, изменение коэффициента преломления с изменением атмосферных условий не позволяет здесь в полной мере реализовать высокую направленность лазерного излучения. На ВДНХ демонстрировался действующий макет установки, показывающий принцип возможной организации телефонной связи в космосе при помощи лазера на арсениде галлия, питаемого от солнечных батарей. Лазер излучал импульсы длительностью в 1 *мксек* с частотой следования 400 *гц*, которые затем принимались фотоприемником и преобразовывались в звуковые сигналы. Американская фирма RCA разрабатывала лазерную линию типа «Космос — Земля» для связи экипажа космического корабля «Джеминай» с Землей. В передающей бортовой станции массой 2,7 *кг* использовались четыре лазерных диода из арсенида галлия, снабженные термоэлектрической системой охлаждения. Передатчик излучал импульсы мощностью 16 *вт* длительностью 70 *нсек* с частотой следования 8 *кгц*. Расходимость луча лазера на выходе оптической системы составляла 0,1 град. Расчетная дальность действия этой ЛЛС составляла более 2000 *км*. На земле располагались приемная станция и лазерный маяк (аргоновый лазер, излучающий на волне 0,5 *мкм*) для наведения при помощи телескопического устройства передающей бортовой станции на наземную. В ноябре 1965 г. эта система была испытана при полете космического корабля «Джеминай-7». Были предприняты четыре попытки установления связи, но наземные станции не смогли уверенно принять сигналы, посланные с космического корабля. Основная трудность этого эксперимента, по мнению специалистов, заключалась в том, что наведение лазера на маяк осуществлялось вручную.

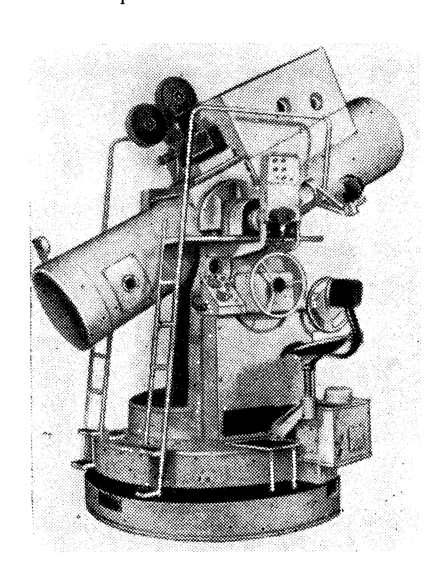


Рис. 30. Кинотеодолит (баллистическая камера), предназначенный для слежения за искусственными спутниками Земли.

Большой интерес представляет применение лазеров для связи с космическими кораблями при вхождении их в плотные слои атмосферы, когда радиосвязь прекращается из-за того, что радиоволны не проходят через слой газовой плазмы, возникающей вокруг корпуса корабля. Известно, что лазерный луч сравнительно легко проходит через плазму. В последнее время за рубежом была установлена возможность осуществления лазерной связи с космическим кораблем

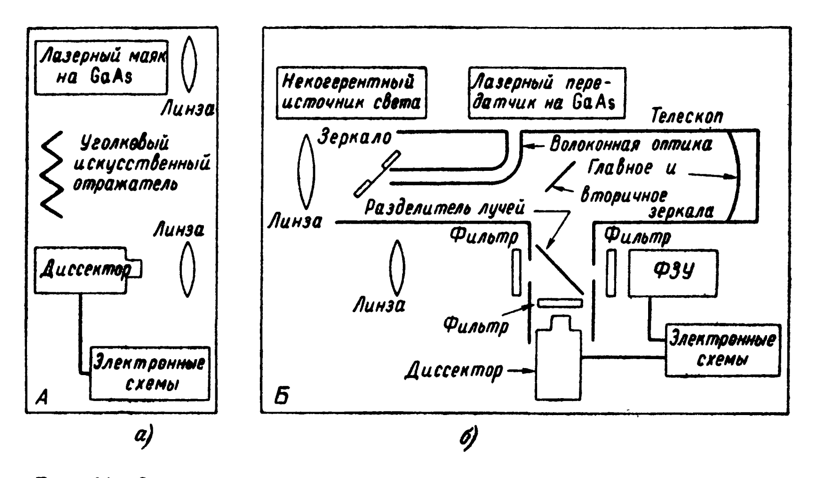


Рис. 31. Схема лазерной системы наведения для встречи космических кораблей в космосе.

а — аппаратура, размещенная на корабле-«цели»; *б* — аппаратура, размещенная на корабле-«охотнике».

при его вхождении в атмосферу. Существенными трудностями при создании такой связи являются: определение эффективного метода модуляции лазерного излучения, снижение поглощения его в атмосфере, точное сопровождение и удержание луча в точке наведения и др.

Работы по исследованию космической лазерной связи, проведенные в разных странах, показали, что:

ЛЛС обладают значительно большей пропускной способностью, чем радиолинии;

влияние атмосферы оказывает существенное ограничение применению ЛЛС «Земля — Космос», ограничивая их дальность действия и надежность работы;

в передающих станциях ЛЛС должны применяться лазеры с возможно более монохроматическим спектром и излучающие на волнах, лежащих в пределах «окон прозрачности» атмосферы.

эффективность ЛЛС значительно возрастает в случае применения их в космическом пространстве;

Развитие лазерной техники и создание новых элементов лазерных космических систем идет столь быстрыми темпами, что количество задач, решаемых при помощи лазеров в космических исследованиях, будет несомненно возрастать.

В целом можно отметить, что несмотря на наличие целого ряда нерешенных принципиальных и технических проблем происходит непрерывное возрастание количества работ, посвященных исследованиям, направленным на создание практических ЛЛС.

Глава седьмая

ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

Несмотря на несовершенство первых лазеров они сразу же нашли практическое применение в различных отраслях народного хозяйства. О некоторых основных направлениях использования лазеров было подробно рассказано в предыдущих главах, однако круг возможностей лазерной техники этим далеко не ограничивается.

Появление ОКГ позволило реализовать новый принцип безлинзового объемного фотографирования (голографию), при котором на фотопластинке фиксируется не само изображение объекта, а волновая картина рассеянного им света. При этом в голографии не применяются какие-либо линзы или зеркала, являющиеся неотъемлемой частью любого фотоаппарата и фокусирующие изображение объекта на светочувствительную поверхность пластинки, превращая его из трехмерного в двумерное.

Безлинзовый способ фотографирования — голография был открыт в 1947 г. сотрудником Лондонского университета доктором Д. Габором. Однако этот способ долгое время не мог быть реализован из-за отсутствия фотоматериалов с высокой разрешающей способностью и, главное, источников когерентного света, обладающих достаточной интенсивностью излучения.

Как известно, свет — это электромагнитные волны, характеризующиеся длиной волны, амплитудой и фазой. При фотографировании обычным способом волны видимого света, отраженные от объекта, падают на фотопластинку, создавая на ней изображение объекта. За время экспозиции (каким бы малым оно ни было) фаза световых волн успевает измениться Поэтому на фотопластинке фиксируется только распределение амплитуд падающих световых волн. Именно они и определяют чередование темных и светлых участков на фотоснимке, образующих двумерное изображение объекта.

При голографическом методе фотографирования в формировании фотоснимка (голограммы) участвуют и амплитуда и фаза световой волны, отраженной от объекта. Поэтому для получения голограммы необходимо, чтобы во время фотографирования фаза световой волны источника света оставалась постоянной. Таким источником света является лазер. Наиболее подходящим оказался газовый лазер непрерывного действия (гелий-неоновый ОКГ), обладающий наиболее высокой когерентностью и монохроматичностью излучения.

Для получения голограммы (рис. 32) необходимо, чтобы на фотопластинку одновременно со светом, отраженным объектом (предметный или сигнальный луч), попадала некоторая часть света непосредственно от лазера — эталонный (опорный) пучок. Волны эталонного луча обладают одинаковой амплитудой и характеризуются постоянным соотношением фаз. Волны предметного луча вследствие отражения от различных точек поверхности фотографируемого объекта имеют разные амплитуды и случайные фазы. В результате совокуп-

ность световых волн, отраженных от облучаемого лазером объекта, имеет весьма сложный характер. При этом каждая точка объекта отражает свет практически на всю поверхность фотопластинки, так что на каждую точку пластиинки падает свет, отраженный от всего объекта. Одновременно с этим на пластинку падает опорный луч. Эта сложная картина распределения световых волн фиксируется на

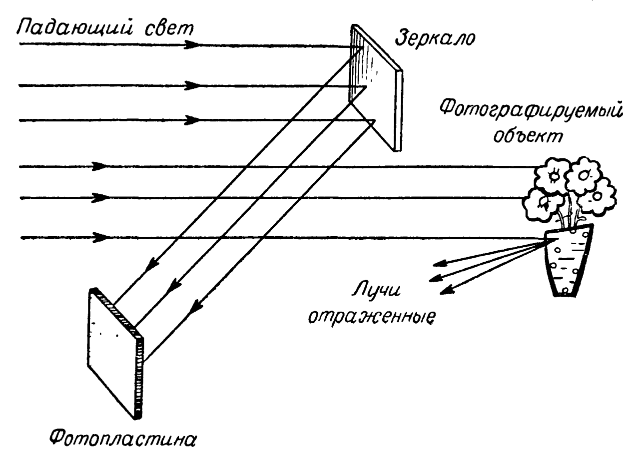


Рис. 32. Схема получения голограммы.

поверхности пластинки следующим образом. Амплитудное распределение световых волн отмечается потемнением фотоэмульсии, а фаза волны, падающей на фотопластинку, регистрируется при помощи опорного луча, волны которого интерферируют с волнами сигнального луча. В результате интерференции волн предметного и опорного лучей вся информация, которую несут световые волны, отраженные от объекта, записывается на фотопластинке в виде сложной интерференционной картины — голограммы.

Сама голограмма (рис. 33) по внешнему виду не имеет ничего общего с реальным изображением объекта, однако при освещении ее лучом лазера (рис. 34) зафиксированная на пластинке интерференционная картина образует в пространстве изображение объекта фотографирования; это восстановленное изображение обладает всеми особенностями объемности. При этом для его получения не требуется каких-либо дополнительных оптических смотровых устройств, как в обычной стереоскопической фотографии. Четкость голографического изображения получается по крайней мере в 10 раз большей, чем у обычной фотографии, сделанной самым лучшим объективом. Это изображение обладает всеми зрительными свойствами, присущими реальному объекту. Так, например, при изменении положения наблюдателя изменяется и угол, под которым виден воспроизводимый голограммой в пространстве объект, т. е. можно рассмотреть скрытые прежде детали объекта. Когда в изображении один объект закрывает другой, то, двигая головой, можно как бы заглянуть за заслоняющий объект сбоку и увидеть то, что до этого он загораживал.

Если разбить фотопластинку с голограммой, то каждый ее осколок обладает способностью воссоздать изображение всего объекта. Это связано с тем, что, как уже отмечалось, при записи голограммы каждая точка поверхности пластинки воспринимала свет, отраженный от всех точек объекта фотографирования В принципе на одну пластинку можно последовательно записать до 150 голограмм, а затем восстановить каждую из них без помех со стороны остальных.

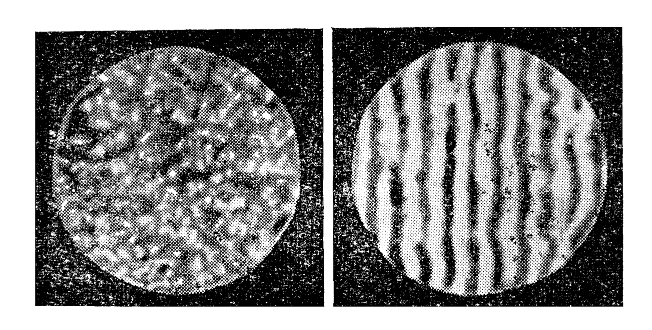


Рис. 33. Вид голограммы под микроскопом.

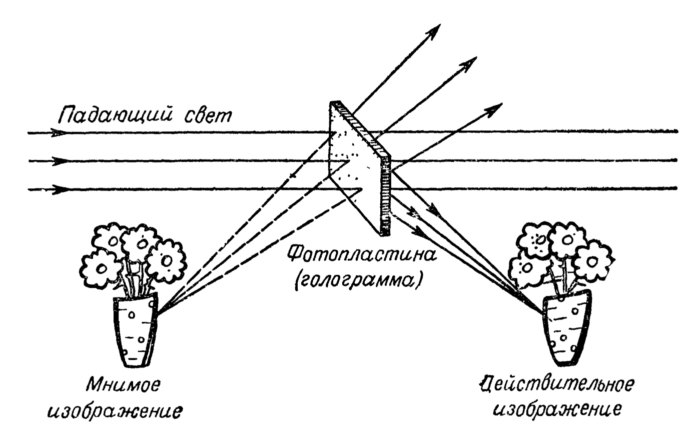


Рис. 34. Схема восстановления изображения обьекта по его голограмме.

Это можно осуществить, применяя лазеры, излучающие на разных волнах, или поворачивая при каждой съемке фотопластинку на определенный угол относительно опорного луча.

Первым практическим применением голографии явилось увеличение изображений Для этого в голографическом микроскопе для записи голограммы использовалось более коротковолновое лазерное излучение, чем то, при котором восстанавливалось изображение. В ре-

зультате изображение оказывалось увеличенным во столько раз, во сколько раз длина волны восстанавливающего его лазерного излучения была длиннее, чем у записывающего лазера. Получая, например, голограммы в рентгеновском монохроматическом излучении и воспроизводя их в лазерном свете, оказалось возможным увидеть расположение атомов в молекуле. При другом способе увеличение голограмм получается путем освещения объекта и пластинки при съемке расходящимися лучами, что приводит к увеличению масштаба изображения. При восстановлении в микроскопе голограмма также освещается расходящимся лучом лазера, что дает дополнительное увеличение изображения.

В технике голография применяется для интерферометрического контроля изделий. При этом методе контроля сложная изготовленная деталь освещается на стенде лазерным лучом и рассеянный ею свет пропускается затем через голограмму шаблона этого изделия. При отличии формы детали от ее шаблона возникают интерференционные полосы, число и расположение которых в пространстве характеризует степень отличия формы детали от ее шаблона. Другое применение голографии в технике — обнаружение ничтожно малых вибраций и деформаций изделий. Записав голограмму вибрирующей детали, можно определить по четким и размытым местам восстанавливаемого по ней изображения, как вибрирует деталь, и измерить амплитуду вибраций. Для определения деформаций объемное голографическое изображение детали совмещается с ее же изображением, полученным при снятых нагрузках. Наличие деформации приводит к несовпадению обоих изображений. При помощи специальных приборов могут быть измерены как величины самих деформаций, так и вызвавших их напряжений.

Голография нашла применение и в криминалистике. В павильоне «Физика» на ВДНХ СССР демонстрируется голографическая установка для быстрого распознавания отпечатков пальцев

Большой интерес представляет применение голографии для создания объемного кино и телевидения. Объемное голографическое кино может быть получено, если на кинопленку записаны голограммы, снятые в определенной последовательности и просвечиваемые затем лазерным лучом, но пока такое кино не получило практического воплощения. Для реализации голографического телевидения необходимо, как показывают расчеты, в несколько сотен раз расширить полосу пропускания телевизионного канала. В настоящее время уже удалось осуществить медленную передачу одного кадра (одной голограммы) на большое расстояние. При этом контур передаваемого объекта наблюдался даже тогда, когда связь была прервана в течение 90% времени передачи.

Применяя для записи на обычной черно-белой фотопластинке лазеры с лучами разного цвета, можно получить цветную голограмму. Цветная фотопластинка состоит из трех слоев, чувствительных к красному, зеленому и синему цвету, различные сочетания которых дают любые цвета спектра. Если лучами трех лазеров, дающих красное, зеленое и синее излучение, одновременно записать, а потом воспроизвести голограмму, то получится цветное объемное изображение. Для этой цели могут быть использованы, например, так называемые многоцветные лазеры на основе химических красителей. Подобный многоцветный лазер «Аккорд», дающий одновременно красный, желтый и синий лучи в импульсном режиме, создан в Институте радиофизики и электроники АН УССР.

Голография открывает большие возможности для хранения больших объемов информации, так как позволяет значительно повысить плотность записи информации по сравнению с существующими системами записи. В связи с этим ведутся работы по записи голограмм в кристаллах, чувствительных к лазерному излучению. Запись голограмм в кристаллах (объемная запись) позволяет значительно увеличить плотность записи. Опыты показали, что плотность голографической записи может достигать 10^{12}—10^{13} двоичных единиц в кубическом сантиметре. Это означает, что в каждом кубическом сантиметре такой среды можно будет поместить информацию, которую содержит библиотека из пяти миллионов книг по 200 страниц в каждой, если считать, что на каждой странице находится тысяча слов, состоящих из семи букв.

К техническим трудностям реализации голографических методов относится необходимость высокой стабильности положения объекта во время записи голограммы (стотысячные доли сантиметра), так как

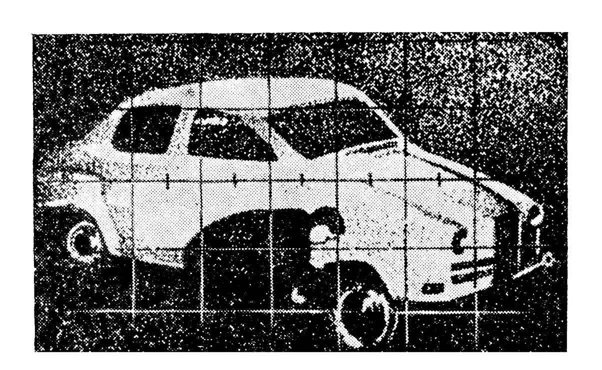


Рис. 35. Фотография телевизионного изображения, полученного лазерной телевизионной установкой дождливой ночью с расстояния 9 *м* (США).

иначе изображение вследствие изменения фаз отраженных волн будет размазываться, а также необходимость большой яркости лазерного луча. Увеличивая яркость пучка, можно довести время съемки до тысячных долей секунды, но и этого часто бывает недостаточно.

В обычном телевидении недавно была разработана лазерная система, получившая название «бегущий луч», в которой для получения телевизионного изображения используется газовый лазер. Луч лазера быстро перемещается (сканирует) по объекту, последовательно освещая его участки, а вместо телевизионной камеры применяется фотоэлектронный умножитель, принимающий отраженный от объекта лазерный луч. Длина волны и мощность излучения лазера выбираются исходя из условий работы аппаратуры и необходимой дальности ее действия. Качество работы системы определяется главным образом совершенством ее сканирующего устройства. Изображение, получаемое системой «бегущий луч», обладает такой же четкостью, как и у существующих обычных телевизионных систем. Однако

при более тщательной отладке системы сканирования качество изображения может быть улучшено. В отечественной установке «бегущий луч» в качестве источника света был применен газовый гелий-неоновый лазер непрерывного действия, работающий на волне 0,6328 *мкм* и имеющий выходную мощность в несколько милливатт. Такая мощность вполне достаточна для получения в полной темноте изображения предмета, удаленного от установки на 9—10 *м* (рис. 35). При замене гелий-неонового лазера в этой системе аргоновым с мощ-

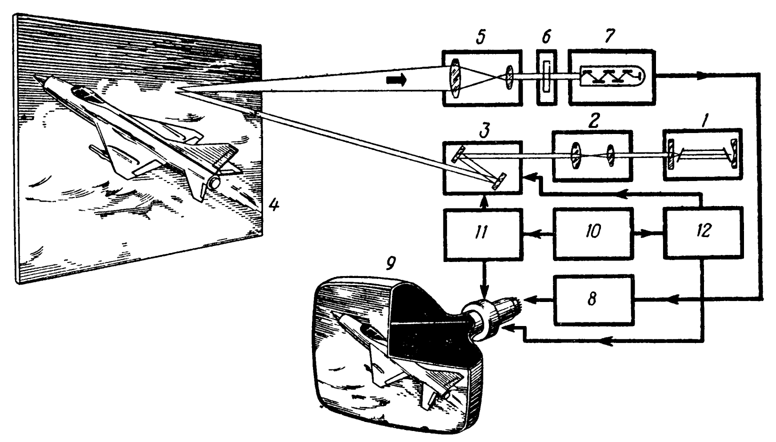


Рис. 36 Схема построения лазерной телевизионной системы «бегущий луч»

1 — газовый ОКГ; *2* — коллиматор; *3* — сканирующее устройство; *4* — объект; *5* — объектив; *6* — интерференционный светофильтр; *7* — ФЭУ; *8* — широкополосный видеоусилитель; *9* — кинескоп; *10* — синхрогенератор; *11*, *12* — системы формирования строчной и кадровой развертки соответственно.

ностью излучения до одного ватта дальность действия системы возрастает примерно до двух километров.

На рис. 36 изображена блок-схема системы «бегущий луч». Излучение газового лазера *1* через коллимирующую оптическую систему *2* поступает на сканируюшее устройство *3*, осуществляющее строчную и кадровую развертку луча. Сканирующее устройство состоит из двух призм, отклоняющих луч лазера в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Вначале луч попадает на 16-гранную призму строчной развертки, вращающуюся со скоростью 60 000 *об/мин* и обеспечивающую перемещение луча в горизонтальной плоскости. Затем луч направляется на 26-гранную призму кадровой развертки, вращающуюся со скоростью 150 *об/мин* и перемещающую луч в вертикальной плоскости.

Отраженное от поверхности объекта *4* излучение поступает в приемную часть системы, состоящую из объектива *5*, интерференционного светофильтра *6* и фотоэлектронного умножителя *7*. Промодулированный электрический телевизионный сигнал с выхода умножителя усиливается широкополосным усилителем *8* и поступает на кинескоп *9*. Синхронизация развертки электронного луча кинескопа с разверт-

кой оптического луча осуществляется синхронизатором *10* с двумя фотоэлементами, установленными на пути лазерного луча, и связанными с системами формирования строчной *11* и кадровой *12* развертки.

Применение более мощных газовых лазеров и улучшение сканирующей системы дают возможность уже в ближайшем будущем создать телевизионные системы с большой дальностью действия. Наиболее совершенными в настоящее время считаются электрооптические сканирующие системы с прозрачными кристаллами, оптические свойства которых изменяются под воздействием электромагнитного поля и которые отклоняют проходящий через них лазерный луч при подаче на них электрического напряжения.

Газовые лазеры применяются вместо прожектора при аэрофотосъемке местности в условиях слабого естественного освещения. Такое лазерное устройство подобно телевизионной системе «бегущий луч», но в нем применяется только одна призма строчной развертки, так как кадровая развертка изображения получается за счет перемещения летящего над местностью самолета.

Лазеры начинают применяться еще во многих других отраслях промышленности и народного хозяйства. По формируемой лучом гелий-неонового лазера непрерывного излучения дифракционной картине производятся измерения с точностью до тысячных долей микрона диаметров тонких проволок, осей часовых механизмов, алмазных фильер, шага намотки различных спиралей. Такой лазерный «штангенциркуль» может производить измерения в пределах от 5 до 500 *мкм*. С помощью газовых лазеров, пользуясь хорошо известным интерферометрическим методом измерений, можно производить калибровку мерительного инструмента, точное измерение различных размеров. Лазерные интерферометрические измерители получают применение в точном машиностроении при высокоточной обработке деталей и проверке мерительного инструмента вместо образцовых мер длины, что значительно сокращает и упрощает процесс проверки. Так, например, проверка делений метра лазерным интерферометрическим методом сокращает срок проверки с нескольких недель до пятнадцати минут.

Во многих странах началось производство различных станков с программным управлением при помощи газовых лазеров непрерывного излучения. В одном из таких станков газовый гелий-неоновый лазер будет применяться при сверлении деталей для осуществления непрерывного контроля и коррекции диаметра отверстия. Это позволит, как полагают, получить точность 0,1—0,2 *мкм* при минимальном диаметре отверстия 1,25 *мкм*. Для осуществления высокоточной центровки различных механизмов и машин (металлообрабатывающих станков, подшипников, турбин, штампов и т. п.) и обработки деталей с высокой точностью разработан специальный лазерный детектор. Операция по центровке с помощью этого детектора производится в 10 раз быстрее, чем обычными оптическими устройствами. Метод обеспечивает точность 0,8 *мкм* на метр, что примерно в 5 раз выше точности, получаемой с юстировочным телескопом. Угловая точность метода составляет 0,2″. При наладке этим методом, например, токарного станка детекторная головка устанавливается на суппорте станка, а на его задней бабке устанавливается лазер. Сигналы с выхода детектора поступают на двухканальный самописец, регистрирующий смещения суппорта относительно двух осей при перемещении его к бабке с лазером. По графику представляется возможным опреде-

лять ошибки до 2,5 *мкм* при одиночных замерах и до 1,3 *мкм* при их повторении.

Японские электронные фирмы «Мицубиси электрик» и «Хитати» для сокращения времени разработки автомашин, которое длится от создания в мастерской опытной модели до начала сборки серийной модели на конвейере, разработали специальные лазерные установки. С их помощью по контурам глиняных моделей отдельных деталей составляются цифровые характеристики новой автомашины.

В легкой промышленности лазеры начинают применяться в автоматах для раскроя тканей В обычных раскроечных машинах кипа из 30—40 слоев ткани с помощью механических ножей в виде дисков или стальных лент разрезается по картонным выкройкам-шаблонам на отдельные заготовки деталей одежды Скорость раскроя у этих машин сравнительно небольшая, кроме того, механический нож зачастую сминает края заготовок в нижних слоях кипы, бракуя их Лазерный нож может разрезать кипу ткани значительно быстрее и без порчи заготовок Наиболее подходящим для этой цели оказался газовый лазер непрерывного действия на углекислом газе, излучающий в инфракрасном диапазоне Он недорог, обладает достаточной мощностью излучения, при работе с ним не нужны темные защитные очки. Лучом лазера мощностью 40 *вт* легкие ткани разрезаются со скоростью 3 *м/сек*. Увеличение мощности излучения до 1 *квт* даст возможность легко раскраивать различные ткани в кипах любой толщины. В Ленинградском институте текстильной и легкой промышленности совместно со специалистами Ленинградского института точной механики и оптики разработан автоматический раскройщик тканей с лазером на углекислом газе. Лазер располагается под столом, на котором производится раскрой тканей. С помощью системы зеркал его луч выводится на расположенную над столом подвижную каретку с линзой, фокусирующей луч на поверхность раскраиваемой ткани Перемещение каретки управляется программным устройством, в которое закладывается катушка с перфорированной лентой, на которой закодирован шаблон заготовки. Качество раскроя тканей лазерным ножом получается очень высоким Автоматизация процесса раскроя повышает производительность труда, позволяет свести до минимума отходы материала и очень быстро осуществить перестройку производства на выпуск новых моделей одежды. не надо будет готовить новых шаблонов, а только сменить программу. Применение цифровых вычислительных машин даст возможность легко осуществить подгонку модели одежды под индивидуальные размеры.

Аналогичная установка для раскроя фанерных листов толщиной до 18 *мм* была спроектирована и внедрена в производство в Англии. В ней используется лазер на углекислом газе с мощностью 200 *вт* в непрерывном режиме излучения. На этой установке можно также производить раскрой листов нержавеющей стали и титана толщиной до 0,25 *мм* при скорости резания примерно 200 *мм/сек*, т. е. в 10 раз быстрее, чем при применении механической пилы.

При помощи лазерного излучения и использовании эффекта Допплера оказалось возможным с высокой точностью измерять очень маленькие скорости перемещения. Из радиолокации известно, что допплеровский сдвиг частоты, соответствующий скорости перемещения объекта v, составляет:

$$\Delta f_{д} = 2vf/c,$$

где c — скорость света, а f — частота излучения передатчика. Для измерения скоростей этим методом наиболее подходящими являются газовые лазеры из-за очень высокой степени монохроматичности и когерентности их излучения. Частота излучения обычно используемых для этого газовых лазеров составляет 10^{14} *гц*. Поэтому скорости перемещения объекта, равной нескольким сантиметрам в секунду, в оптическом диапазоне будет соответствовать допплеровский сдвиг частоты 10 *кгц*. Для сравнения следует отметить, что в радиодиапазоне на частоте 10^{10} *гц* этой же скорости соответствует допплеровский сдвиг частоты всего в несколько герц, который трудно измерить с большой точностью.

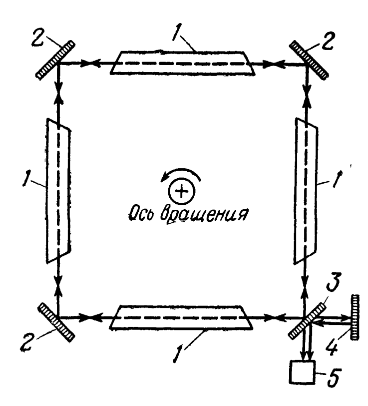


Рис. 37. Схема оптического гироскопа.

1 — газовые ОКГ; *2* — зеркала; *3* — полупрозрачное зеркало; *4*—неподвижное зеркало; *5* — ФЭУ.

На эффекте Допплера основана также работа лазерного гироскопа. Лазерный гироскоп обладает более высокой надежностью, стабильностью и чувствительностью, чем обычные механические гироскопы, широко применяемые в навигационных приборах кораблей, самолетов и ракет для определения курса. Основой лазерного гироскопа (рис. 37) являются расположенные на общей платформе четыре гелий-неоновых лазера непрерывного излучения *1*, расположенные по сторонам квадрата, и система зеркал *2*, *3*, установленных в углах этого квадрата под углом 45° к осям лазерных трубок. Таким образом, четыре лазерные трубки образуют замкнутый контур, так называемый кольцевой лазер. Так как каждый лазер излучает в двух противоположных направлениях, в контуре системы возникают два световых луча, распространяющихся по замкнутому контуру в противоположных направлениях. Через полупрозрачное зеркало *3*, расположенное в одном из углов квадрата, эти лучи попадают на вход фотоэлектронного умножителя *5*. Если платформа неподвижна, оба луча приходят на вход умножителя в одной фазе и на выходе ФЭУ не возникает никаких сигналов. При вращении платформы в плоскости кольцевого лазера в обоих лучах возникает допплеровский сдвиг частоты и разностная частота биений выделяется на выходе фотоэлектронного умножителя *5*. Эта частота равна удвоенной допплеровской частоте и измеряется частотомером. Величина допплеровского сдвига частоты линейно связана со скоростью вращения платформы Для определения скорости вращения платформы v достаточно измерить разность угловых частот излучения лазеров:

$$\omega_1 - \omega_2 = 8\pi v/\lambda,$$

где λ — длина волны излучения ОКГ. Основным достоинством лазерного гироскопа является отсутствие в нем подвижных частей. Его выходной сигнал может быть выражен в цифровой форме, поэтому лазерный гироскоп легко сопрягается с цифровой вычислительной

машиной (ЦВМ). Недостатком первого лазерного гироскопа были его довольно большие размеры. Например, у экспериментального образца гироскопа с четырьмя гелий-неоновыми лазерами, излучающими на волне 1,153 *мкм*, длина плеча составляла 1 *м*. С целью уменьшения габаритов и упрощения конструкции был разработан гироскоп с кольцевым лазером, состоящим из трех гелий-неоновых лазеров, излучающих на волне 0,6328 *мкм*. Одна из моделей такого гироскопа содержала лазеры длиной по 30 *см*. Габариты этого гироскопа не превышали 0,25 $м^2$. Было установлено, что гироскопом возможно производить измерение угловых скоростей от 0,001 *град/час*. Гироскопы на газовых лазерах могут с успехом применяться, например, на подводных лодках и кораблях, где на размеры и массу приборов не накладывается существенных ограничений. Существенное уменьшение габаритов лазерного гироскопа может быть достигнуто при применении в нем полупроводниковых лазеров, излучающих в диапазоне 0,71—0,84 *мкм*.

Каждый лазерный гироскоп может измерять угловые скорости только в одной плоскости, поэтому для измерения угловых скоростей в трех плоскостях надо объединять три таких прибора. Американские специалисты предполагают установить трехстепенной лазерный гироскоп на космическом корабле.

Постоянно увеличивается круг вопросов, которые лазеры помогают решать в научных исследованиях. Так, сверхмощные лазеры, излучающие очень короткие импульсы огромной мощности, применяются для возбуждения термоядерных реакций. Работы по созданию с помощью лазеров горячей плазмы, необходимой при исследовании проблемы термоядерного синтеза, проводятся как в нашей стране, так и за рубежом. Одним из возможных «лазерных» путей овладения термоядерной энергией является испарение вещества под воздействием мощного лазерного луча. При этом образуется плазма, которая потом, будучи нагретой лазерным лучом до достаточной температуры, сама себя поддерживает. При другом методе исследований ранее полученная плазма нагревается лучом лазера до температуры, обеспечивающей возникновение термоядерной реакции. Первый метод более простой, но для его осуществления необходимо направить на вещество световую вспышку энергией до 10^6 *дж* и длительностью всего 10^{-10} *сек* Американскими учеными в Рочестерском университете был сконструирован для этой цели лазер, способный излучать импульсы длительностью 10^{-10} *сек* и энергией до 200 *дж*. Для нагрева плазмы могут быть применены также лазеры непрерывного излучения на углекислом газе, от которых уже получено излучение мощностью в несколько десятков киловатт. В импульсном режиме эти лазеры способны давать энергию до 10 *дж* при длительности импульсов от 1 до 10 *мксек*.

При первом методе получения плазмы мощный лазерный импульс испаряет «мишень» — шарик из смеси дейтерия и трития, помещенный в вакуумную камеру. Этот метод разрабатывается как в нашей стране, так и за рубежом. Световой импульс длится малые доли секунды, а мощность его достигает многих миллиардов ватт. В результате многочисленных опытов этим способом была получена плазма с температурой около двух миллиардов градусов с плотностью, приближающейся к плотности твердого вещества. В 1968 г советскими учеными при энергии импульса 30 *дж* и длительности импульса 30 *нсек* был зарегистрирован выход нейтронов — начало термоядерной реакции. Аналогичный результат летом 1969 г. был получен американскими учеными.

Недавно, в конце 1971 г., советскими учеными под руководством доктора физико-математических наук Ю. П. Райзера в экспериментальной лаборатории Института проблем механики при помощи лазера была впервые получена свободно парящая в пространстве долгоживущая плазма. В созданной для этого установке (оптическом плазматроне) плазма образовывалась в камере с инертным газом ксеноном, находящимся под давлением в несколько атмосфер. Для поджига плазмы в опытах использовался мощный импульсный лазер, создававший электрический пробой газа в камере, где должна была возникнуть плазма. Для поддержания возникшей плазмы использовалось непрерывное излучение газового лазера мощностью 150 *вт*, сфокусированное в точку пробоя газа. Температура плазмы в ксеноновой среде достигала почти 15 000 °С, а в аргоновой среде — почти 20 000 °С. По мнению ученых оптический плазматрон может быть использован, в частности, как источник света очень большой яркости в технологических процессах, при обработке металлов.

Очень широко применяются газовые лазеры для так называемой диагностики плазмы — измерений с более высокой точностью, чем это позволяют обычные методы, ее температуры и плотности.

Интересные возможности открывает применение газовых лазеров для создания сверхточных стандартов частоты и времени Советские физики создали лазер, который, как показывают расчеты, может дать стандарты частоты излучения в диапазоне видимого света. С помощью такого лазера оказалось возможным осуществить «часы», которые за 10 миллионов лет будут отставать всего на одну секунду. Физики еще не знали такой точности измерений. Эти сверхточные «часы» будут очень полезны астрономам, они позволят значительно увеличить точность систем космической навигации, усовершенствовать методы и принципы многих экспериментов Так, например, по современным представлениям происходит расширение Вселенной, поэтому возникает необходимость выяснить, не претерпевают ли изменения такие основные мировые константы, как скорость света, гравитационная постоянная. В настоящее время скорость света измерена с точностью до шести знаков. Лазерный стандарт позволит измерить ее с точностью до 10—12 знаков, что даст возможность определить, действительно ли мировые постоянные являются раз и навсегда заданными величинами.

С помощью газовых лазеров была произведена еще одна проверка теории относительности Эйнштейна. Одним из ее постулатов является утверждение о неизменности скорости света Постулат этот был установлен Эйнштейном на основе опыта Майкельсона — Морли, использовавших для этой цели интерферометрический метод, дающий ошибку измерения 2,5%. При помощи газовых лазеров опыт Майкельсона — Морли был повторен, причем точность его была увеличена примерно на три порядка Суть опыта состояла в том, что частота излучения гелий-неонового лазера определяется временем распространения его излучения в резонаторе, так что изменение скорости распространения излучения в резонаторе проявляется в виде изменения частоты лазерного излучения Было установлено, что при различной ориентации лазера относительно Земли частота его излучения не изменялась; это подтвердило отсутствие изменения скорости света с точностью до 0,03 *мм/сек*.

Появление сверхмощных лазеров привело к возникновению в оптике нового раздела — нелинейной оптики. Физикам пришлось пересмотреть процессы взаимодействия энергии с веществом. Оказалось,

что ряд веществ, прозрачных для потоков энергии с небольшой плотностью, при возрастании плотности энергии изменяют свои свойства и начинают сильно поглощать энергию, становясь малопрозрачными. Наблюдается и обратное явление — просветление непрозрачных веществ при увеличении плотности энергии их облучения. Развитие теории этих явлений имеет большое значение для науки. Так, например, теоретически был установлен эффект самофокусировки излучения в веществах. Этот эффект возникает вследствие того, что мощное лазерное излучение изменяет показатель преломления вещества, в результате чего в нем образуется подобие линзы, фокусирующей излучение. Позже этот эффект был установлен экспериментально.

Другой интересной проблемой, порожденной нелинейной оптикой, является распространение света в так называемых усиливающих средах. Дело в том, что в этих средах скорость распространения мощного импульса может превосходить скорость распространения света в пустоте, что приводит к появлению ряда интересных эффектов. Такое явление было экспериментально обнаружено советскими физиками при разработке сверхмощного лазера, излучающего в течение миллиардных долей секунды мощность, равную мощности нескольких Братских ГЭС.

Весьма перспективным оказалось применение лазеров в спектроскопии для определения состава веществ. Спектроскопические методы широко применяются в астрономии при изучении состава различных небесных тел, в физических исследованиях и при геологической разведке. Вследствие очень высокой плотности излучения импульсных лазеров под воздействием лазерного луча происходит испарение исследуемого вещества, необходимое для спектроскопического анализа его состава. Возможность очень острой фокусировки лазерного луча на поверхности вещества позволяет исследовать состав мельчайших вкраплений различных пород в геологических образцах, производить анализ образцов массой до одного миллиграмма и обнаруживать наличие примесей, масса которых не превышает 10^{-11} *г*.

Ученые применили импульсные лазеры для высокоскоростной съемки (экспозицией в одну стомиллионную долю секунды) картины взаимодействия гиперзвукового воздушного потока (движущегося со скоростью, в 9—15 раз превышающей скорость звука) с различными телами — так называемого гиперзвукового удара.

Существует гипотеза, что материки очень медленно перемещаются по поверхности земного шара. Это явление было названо дрейфом континентов По современным представлениям скорость перемещения материков составляет в среднем примерно 2—5 *см* в год Ученые полагают, что перемещение материков вызывается конвективными потоками воды в Земле, которые увлекают материки за собой. Разрывы, куда уходят эти потоки (или откуда они выходят на поверхность), могут быть местом перемещения материков На земном шаре существуют места, где с обеих сторон разрывов лежат сравнительно большие скопления суши, находящиеся довольно близко друг от друга Это проливы Баб-эль-Мандебский, Босфор, Гибралтарский, Дарданеллы и др. Экспериментальная проверка гипотезы и изучение такого медленного процесса вполне возможны при использовании газовых лазеров непрерывного излучения, при помощи которых можно обнаружить связанный с этим явлением допплеровский сдвиг частоты

Схема эксперимента по обнаружению дрейфа континента (рис. 38) подобна схеме для измерения при помощи лазеров малых

деформаций. Для проведения эксперимента гелий-неоновый лазер с фотоприемником и индикатором должен располагаться на одной стороне пролива, а отражающие зеркала — на другой его стороне. Средней скорости перемещения материков 5 *см* в год соответствует скорость перемещения 20 *Å/сек*. Поэтому допплеровский сдвиг частоты за одно полное прохождение излучения от передатчика к фотоприемнику составит примерно 1/250 *гц*. При многократном отра-

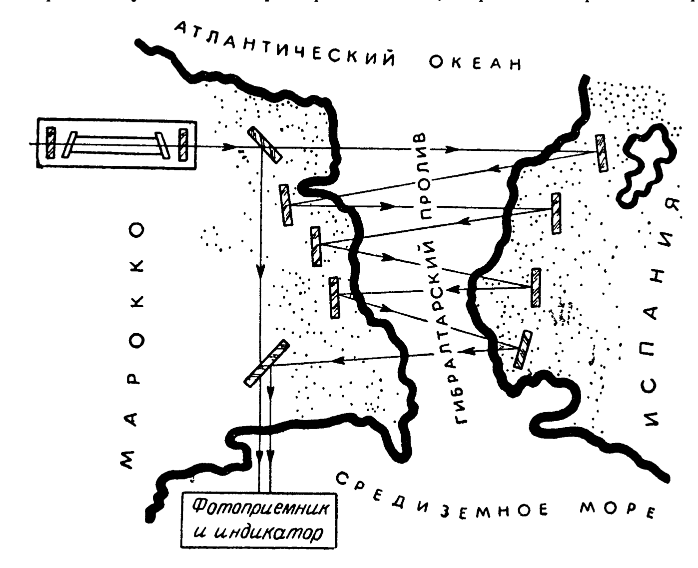


Рис. 38. Схема эксперимента по измерению дрейфа материков.

жении излучения лазера от системы зеркал, расположенных по обеим сторонам пролива, представляется возможным увеличить допплеровский сдвиг до долей и даже единиц герц. Такие величины допплеровского сдвига частоты уже могут быть выделены фотоприемником и индикатором на фоне случайных кратковременных сдвигов частоты излучения самого лазера. Подобные экспериментальные исследования могут оказаться весьма полезными при проведении геодезического изучения поверхности Земли. Аналогичная методика, в частности, может быть применена при изучении движения ледников и перемещения земной коры.

В 1969 г. советские специалисты под руководством кандидата физико-математических наук И. М. Белоусовой разработали макет лазерной допплеровской системы для изучения параметров движения ледников. Предварительные расчеты показали, что для обнаружения движения ледника, перемещающегося с ничтожной скоростью 1,58 *м* в год, достаточно проводить измерения в течение 50 *сек*. Однако лазерная система сможет фиксировать и значительно меньшие скорости. В 1970 г во время пятнадцатой советской антарктической экспедиции И. П. Ивановым были проведены исследования, показавшие, что ус-

ловия этого сурового континента не препятствуют применению измерительных лазерных систем. Дальнейшие экспериментальные измерения скорости движения антарктического ледника производились в районе станции Молодежная на берегу моря Космонавтов. Уже по первым результатам можно утверждать, что применение лазеров в гляциологии (науке по исследованию ледников) является очень перспективным. Они позволяют определять мгновенные значения скорости движения ледника и ее изменения, производить непрерывную регистрацию перемещения ледовых масс, оценивать степень напряженности ледника. Очень важным достоинством этого метода является возможность проведения дистанционных измерений (с расстояний в несколько километров), а также установление момента начала движения льдов. При этом лазерный метод обладает хорошей оперативностью в получении разносторонней информации. В настоящее время Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт планирует провести более широкие и разносторонние исследования. Совершенствование лазерных измерительных гляциологических систем, разработка более разносторонней методики их применения позволят широко использовать лазеры для изучения динамики ледовых масс Антарктиды, скорости дрейфа морских льдов, динамики снежных лавин, воздействия льда и напора воды на гидротехнические сооружения, напряженности ледяных покровов различных акваторий.

Приведенными в этой главе примерами применение лазеров в науке и технике далеко не исчерпывается. Область их использования в народном хозяйстве все время расширяется.

Глава восьмая

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

В наш век многое из того, что вчера представлялось несбыточной мечтой или фантастическим вымыслом, сегодня становится реальной действительностью. Все глубже познавая законы природы, человек совершает настоящие чудеса. Таким реальным чудом на наших глазах становится квантовая электроника, возможности которой поистине неограниченны.

Квантовая электроника — наука очень молодая и развивается она настолько быстрыми темпами, что сегодня трудно дать исчерпывающий прогноз относительно ее практического применения в будущем. Можно сказать, что в настоящее время сделаны еще только первые шаги на пути широкого внедрения квантовой электроники в народное хозяйство и, несомненно, вскоре будут сделаны новые открытия, возникнут новые идеи, которые значительно ускорят развитие этой области науки. Перспективы дальнейшего практического применения лазеров в науке и технике еще только начинают вырисовываться. Исследования, проводимые в области квантовой электроники учеными различных стран, имеют первостепенное значение для развития техники связи, особенно космической, для вычислительной техники, передачи энергии без проводов, исследования термо-

ядерных реакций, создания новой технологии и т. п. Лазеры помогают человеку исследовать Луну, прожигают отверстия в материалах, создают горячую плазму, сваривают различные материалы, проверяют теорию относительности. Лазеры дали в руки медиков и биологов послушный инструмент для исследования живой клетки. На очереди решение проблем, связанных с практическим применением лазеров в вычислительной технике и в химии.

Работы по применению лазеров в вычислительной технике находятся пока еще в начальной стадии; тем не менее основные перспективы использования лазеров в этой области видны уже сегодня. Большие надежды возлагаются на повышение с помощью лазеров быстродействия современных цифровых вычислительных машин (ЦВМ), широко используемых в настоящее время практически во всех областях народного хозяйства, науки и техники Быстродействие современных ЦВМ, измеряемое тысячами операций в секунду, сегодня уже не удовлетворяет требованиям всех потребителей этой аппаратуры.

Быстродействие существующих ЦВМ ограничивается наличием задержек сигналов в электрических схемах, возникновением перекрестных помех и искажений сигналов в цепях, соединяющих различные участки схемы. Проблема повышения быстродействия ЦВМ может быть успешно решена путем применения оптических счетно-решающих схем и элементов, поскольку в оптическом диапазоне вполне осуществима передача сигналов со скоростью 10^6 *бит/сек*. При этом одновременно легко решается вопрос об устранении перекрестных помех, так как в оптических линиях передачи длина волны сигналов значительно меньше размеров элементов цепей. Устраняется необходимость электрических связей между отдельными частями ЦВМ, вносящими элемент ненадежности в работу машины, а также временну́ю задержку вследствие большой постоянной времени переходных процессов.

Результаты теоретических исследований показывают, что существует реальная возможность создания сверхбыстродействующих чисто оптических вычислительных машин (ОВМ) на лазерах, которые могут быть построены по различным схемам. Большинство современных ЦВМ работает на основе двоичной системы счисления, причем логической единице соответствует наличие сигнала, а логическому нулю — отсутствие сигнала. Быстродействие машины определяется скоростью появления логической единицы или нуля. Специалисты полагают, что в ЦВМ лазеры будут применяться для построения запоминающих устройств (так называемых систем памяти) и логических схем. При создании логических схем для ОВМ должен быть использован элемент, работающий в режиме инвертирования входного сигнала, т. е. уменьшающий выходной световой сигнал при увеличении входного. Для осуществления этого предполагается использовать свойство микрочастиц активного вещества квантового генератора находиться на различных энергетических уровнях. Подобный инвертирующий элемент удалось создать на полупроводниковых лазерах из арсенида галлия Устройство его показано схематически на рис. 39. Из арсенида галлия изготавливается моноблок таким образом, что в направлении *а-а* он представляет собой оптический квантовый усилитель, а в направлении *б-б* — генератор. Таким образом, внешнее излучение, усиленное квантовым усилителем, проходит как бы «поперек» генератора. Это осуществляется Т-образным расположением в моноблоке усилителя и генератора. Уровни

накачки генератора и усилителя подбираются таким образом, что при отсутствии сигнала на входе усилителя в направлении *а-а* генератор работает в нормальном режиме и излучает свет в направлении *б-б* Устройство находится в состоянии логической единицы. При появлении на входе усилителя светового сигнала достаточной интенсивности будет происходить истощение возбужденных уровней в активной зоне генератора, так как энергия будет расходоваться на усиление входного сигнала в усилителе. В результате излучение на выходе генератора в направлении *б-б* исчезает. Устройство пере-

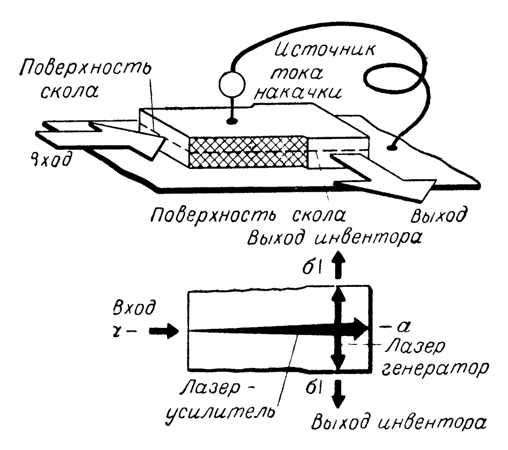


Рис. 39. Лазерный полупроводниковый инвертор.

ходит в состояние логического нуля. Таким образом, появление оптического сигнала на входе устройства как бы тушит его излучение. Подобный эффект дает возможность построить чисто оптическую ЦВМ с быстродействием в несколько сотен или тысяч миллионов операций в секунду.

Другой тип оптических ЦВМ — электронно-оптические вычислительные машины — может быть создан на основе так называемых оптоэлектронных схем на светодиодах (излучающих свет полупроводниковых диодах) и фотодетекторах. В такой схеме электрический сигнал преобразовывается светодиодом в световой, который затем передается по световоду к фотодетектору и преобразовывается им вновь в электрический сигнал. Применение оптических световодов для связи между различными частями в вычислительной машине позволит полностью устранить паразитные наводки сигналов на соседние провода и другие схемы, возникающие при передаче по электрическим проводам коротких сигналов и ограничивающие быстродействие ЦВМ.

Помимо создания логических схем и запоминающих устройств лазеры могут быть использованы в вычислительной технике для предварительной обработки информации, устройств ввода и вывода данных. Здесь лазеры прежде всего могут быть применены для рас-

познавания образов (букв, цифр, силуэтов различных предметов и т. п.) с огромной быстротой, т. е. можно будет практически осуществлять «чтение» машиной документов Один из возможных методов распознавания образов основан на использовании голографии. По этому методу лазерный луч должен будет вначале просветить кадр, содержащий распознаваемые образы, а затем голограмму с эталонным образом, полученную ранее с помощью того же лазера. Возникновение на выходном кадре яркой точки будет свидетельствовать о наличии и месте расположения на кадре искомого образа. Таким методом возможно будет вести одновременный поиск целого ряда образов, расположенных, например, на телевизионном экране. Недостатком метода является невозможность численного выражения результата.

Для усовершенствования запоминающих устройств ЦВМ большими возможностями обладают лазерные голографические методы.

В настоящее время газовые лазеры уже применяются для кодированной записи информации на перфокарты и перфоленты в выходных устройствах обычных ЦВМ. Для этого вместо механических приспособлений устанавливается аргоновый лазер, излучение которого модулируется в соответствии с дискретными данными, поступающими из машины. Мощность лазера составляет около 1 *вт*, и его луч в непрозрачной перфоленте прожигает отверстия диаметром примерно 1 *мм*.

В дальнейшем в ОВМ сможет быть реализована так называемая «картинная логика», при которой машина будет оперировать уже целыми математическими полями, информационными картинами. Быстродействие таких машин, как полагают, возрастет в миллиарды раз.

В химической промышленности лазеры смогут быть использованы для управления и активизации различных химических процессов, для обеспечения протекания процессов в определенном направлении.

Прочность связей между молекулами и атомами в веществе зависит от энергии связей. В молекулах атомы находятся в колебательном состоянии относительно уровней, соответствующих их среднему энергетическому состоянию. При облучении такой молекулы (или группы молекул) лазерным излучением можно будет воздействовать на вполне определенную межмолекулярную или межатомную связь, собственная частота которой совпадает с частотой излучения лазера. При достаточно большой интенсивности лазерного излучения эта связь будет ослабевать и даже нарушаться. Эта особенность воздействия лазерного излучения на молекулы вещества открывает большие возможности для ученых. Представляется возможным выборочно нарушать химические связи в веществах и тем самым вести химические реакции в нужном направлении. Возможно, что для этого окажется необходимым одновременно воздействовать на вещество несколькими лазерами с различными частотами излучения или одним многоцветным лазером достаточной мощности. Это позволит значительно сокращать время и расходы при производстве необходимых синтетических материалов, а также получать новые химические соединения.

В метеорологии лазеры будут применяться при исследованиях атмосферы для определения плотности и высоты метастабильных состояний ее верхних слоев. Лазерная аппаратура для этих исследований будет представлять собой своего рода оптическую локационную станцию с вычислительным устройством, определяющим амплитуду и время задержки отраженного лазерного сигнала. Для

изучения различных составляющих атмосферы в передатчике такой аппаратуры удобно будет применить жидкостной лазер с перестройкой частоты излучения или несколько лазеров, излучающих на требуемых длинах волн. Как показывают расчеты, создание такого метеорологического лазерного локатора является вполне реальным. С помощью лазеров можно будет исследовать замутненность атмосферы. Это представляет большой интерес для метеорологов, так как пыль и вода, находящиеся в атмосфере во взвешенном состоянии, оказывают существенное влияние на погодные условия на Земле.

Несомненно, что в будущем лазеры станут широко применяться в космосе. Предполагается, что в первую очередь на основе лазеров будут созданы высокоточные системы космической навигации и связи, а также устройства для передачи по лазерному лучу энергии на космические летательные аппараты. В настоящее время космические летательные аппараты различного назначения получают необходимую для питания бортовой аппаратуры электроэнергию от солнечных батарей, преобразующих энергию Солнца в электрическую. Однако эти батареи имеют сравнительно небольшой к. п. д. Это ограничивает возможность установки на космические аппараты сложных комплексов научной аппаратуры для проведения разносторонних исследований космического пространства, а также дополнительной аппаратуры для обеспечения нормальной жизнедеятельности самих космонавтов. Проблема эта может быть успешно решена при помощи мощных силовых лазерных установок, расположенных на крупных космических станциях и передающих в виде узких направленных пучков лазерное излучение большой мощности на небольшие искусственные спутники, автоматические межпланетные станции и космические корабли. Таким путем в космосе смогут возникнуть мощные линии беспроводной передачи электромагнитной энергии, подобные линиям передачи энергии на Земле.

Для передачи энергии в виде светового луча на большие расстоянии потребуются лазеры не только большой мощности, но и с высоким к. п. д., а также эффективные преобразователи световой энергии в электрический ток. Обе эти задачи, как показывают достижения квантовой электроники, являются вполне реальными. Прообразом таких лазеров являются полупроводниковые квантовые генераторы, обладающие уже на сегодняшнем уровне развития техники достаточно высоким к. п д. и непосредственно преобразовывающие энергию электрического тока в световую энергию. Советскими учеными было теоретически показано, что с помощью приборов, аналогичных полупроводниковым лазерам, можно производить «выпрямление» света — преобразовывать энергию излучения лазера в электрический ток с к. п. д., близким к 100%. Поэтому можно сказать, что имеются определенные предпосылки для реализации идеи о передаче энергии с помощью света, выдвинутой еще в XIII веке английским ученым Роджером Беконом. Достаточно сказать, что помимо решения задачи энергоснабжения в космосе на земле можно будет легко наладить передачу энергии в труднодоступные горные районы, районы Крайнего Севера и т. п.

В космосе лазерная связь, как показывают эксперименты, дает возможность устанавливать связь на расстояниях до 20 000 *км*. Теоретические расчеты позволяют надеяться на возможность установления связи в космосе на расстояния более 100 000 *км*, а в дальнейшем и на расстояния до десяти световых лет (световой год — это расстояние, которое пробегает свет за год, равное 9,463×

$\times 10^{12}$ *км*). Для сравнения отметим, что диаметр Солнечной системы составляет около одной тысячной доли светового года. Таким образом, может оказаться возможной связь не только с дальними космическими кораблями, но и с другими мирами. Космическая связь с Землей при межпланетных перелетах, очевидно, будет комбинированной: связь в космосе между кораблями и ретрансляционными станциями на спутниках Земли будет осуществляться при помощи лазеров, а между ретранслятором и Землей (или другой планетой с газовой оболочкой) — на обычных радиоволнах. При осуществлении проектов космической связи необходимо считаться также и с затратами энергии на передачу информации. Расчеты показывают, что система лазерной связи будет более экономичной, так как при ее осуществлении на передачу двоичной единицы информации будет расходоваться мощность 10^{-16} *вт* за одну секунду, в то время как радиосистемы, работающие в диапазоне сверхвысоких частот, часто требуют расхода мощности 10^{-7} *вт* за секунду, т. е. лазерные системы явятся энергетически более выгодными.

В настоящее время изучаются возможности применения лазеров в подводных системах связи и локации на Земле. При применении лазеров под водой необходимо учитывать особенности распространения света в жидкой среде. Распространяясь в морской воде, лазерное излучение будет поглощаться растворенными в воде веществами и рассеиваться на взвешенных в ней частицах. Установлено, что наиболее эффективно подводные оптические системы смогут работать при использовании лазеров, излучающих в сине-зеленой области спектра Это связано с видом спектра поглощения морской воды. При этом в зависимости от состояния воды в ней преобладает либо поглощение излучения, либо его рассеяние взвешенными частицами. Практические системы связи на лазерах в морской воде смогут быть созданы только после того, как будет преодолен целый ряд трудностей, связанных прежде всего с уменьшением затухания волн оптического диапазона при распространении в воде.

Широкое применение наземных лазерных линий в земных условиях даст возможность передачи настолько больших объемов информации, что смогут стать реальными такие, на первый взгляд, фантастические проекты, как объединение в единую сеть АТС городов Москвы, Ленинграда и Киева, обмен десятками телевизионных программ между городами, широкая замена обычных телефонов видеотелефонами, проведение по телевидению конференций с неограниченным количеством участников и многое другое.

Большие возможности открываются при работе лазерных дальномерных систем в космическом пространстве. Они смогут обеспечить большую точность измерений при меньшей потребляемой мощности по сравнению с радиолокаторами сантиметрового диапазона волн. Расчеты показывают, например, что при средней мощности излучения 66 *вт* лазерный дальномер сможет измерять расстояния между космическими кораблями до 160 000 *км* с точностью около 1,6 *м* при диаметре приемной оптической системы 60 *см*. Потребляемая мощность такого дальномера будет не более 800 *вт*.

При посадке космического корабля на планету лазерный дальномер сможет измерять с очень большой точностью высоту над выбранным местом посадки корабля. Лазерный дальномер с лазером непрерывного излучения может служить для измерения скорости космического корабля в орбитальном полете над поверхностью планеты. Расчеты показывают, что при высоте орбиты 1 600 *км* и точ-

ности измерения скорости 8% такой дальномер должен иметь лазер с мощностью излучения 40 *мвт* при частоте измерений в один раз за 8 *сек.* Масса такой системы может составить примерно 4,5 *кг.*

В этой главе были отмечены только некоторые возможные перспективы дальнейшего применения квантовой электроники в народном хозяйстве. Однако они наглядно показывают, насколько беспредельны возможности, открываемые перед человечеством этой наукой.

Глава девятая

ОСНОВЫ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ЛАЗЕРАМИ

Создание мощных лазеров импульсного и непрерывного излучения и внедрение их в народное хозяйство поставило со всей серьезностью вопрос о технике безопасности при работе с ними.

Наибольшей опасности при работе с лазерами подвергается зрение людей. В настоящее время установлено, что серьезное поражение глазам может причинить не только прямое лазерное излучение, но и излучение, отраженное от различных поверхностей В этих случаях может произойти нарушение зрения за счет повреждения сетчатки глаз, причем в случае поражения наиболее чувствительной к свету области сетчатки (вблизи ее центральной части) может произойти даже потеря зрения. В результате многочисленных опытов над животными учеными было установлено, например, что у кролика поражение сетчатки глаза происходит при плотности энергии излучения лазера 0,7 *дж/см*^{2} При более значительных величинах плотности энергии излучения может иметь место взрывоподобное разрушение пигментных клеток сетчатки глаза.

Непосредственное попадание энергии излучения мощных лазеров на кожу человека вызывает разрушение ее тканей. При этом пигментированные клетки тканей поражаются в наибольшей степени Расчеты показывают, что при попадании на участок кожи животного размером в 1,5 *мм* излучения лазера с энергией 1 *дж* температура тканей на глубине 100 *мкм* повышается до 60 °С. Это приводит к возникновению уже необратимых процессов разрушения (коагуляции) белков. В кровеносных сосудах коагуляция (свертывание) крови приводит к возникновению тромбов.

Эксперименты на животных показали, что лазерное излучение оказывает поражающее действие и на нервную систему Так, например, облучение лазером головы мыши приводило к тяжелым поражениям ее головного мозга Повышение энергии излучения лазера до величины примерно 100 *дж* приводило к смертельному исходу у 75% облученных животных. Причиной поражения нервных тканей ученые считают ударную волну, возникающую в клетках при их быстром нагреве лазерным излучением. При воздействии на биологическую структуру импульсного лазерного излучения жидкая часть клеток нагревается до температуры свыше 100 °С.

Для защиты глаз людей, работающих с лазерами, от излучения были разработаны специальные защитные очки со светофильтрами, поглощающими лазерное излучение и ослабляющими тем самым его вредное воздействие на глаза. Помимо этого был разработан специальный дозиметр, который дает возможность устанавливать и контролировать допустимый уровень излучения для работающих с ла-

зерами людей. В ряде стран были даже приняты специальные законы, запрещающие продажу лазеров частным лицам.

Изучение степени опасности воздействия излучения лазеров на живые организмы еще далеко не закончено, но уже полученные сведения говорят о том, что всем работающим с этими устройствами необходимо избегать воздействия не только прямого, но и отраженного лазерного излучения на любые части организма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вы прочитали эту книгу о том, как лазеры служат людям. Многие из вас, наверное, с захватывающим интересом читали написанную почти пятьдесят лет назад повесть А. Н. Толстого «Гиперболоид инженера Гарина». Выдумка писателя представлялась нам такой правдоподобной. Гиперболоид казался реальностью, а его возможности почти беспредельными. Появление лазеров заставило нас снова вспомнить о гиперболоиде инженера Гарина; оказалось, что лазеры шагнули в реальный мир прямо со страниц фантастического романа. Хотя мощность излучения лазеров пока что еще не так велика, как у мифического гиперболоида, однако сегодня они могут делать уже очень многое: измерять с высокой точностью расстояния, обрабатывать и резать материалы, устанавливать связь, лечить людей, «поджигать» плазму, создавать сверхточные часы и многое другое. Они становятся новым, весьма эффективным инструментом в руках ученого, инженера, врача.

На примере лазеров хорошо виден путь, который прошли современная наука и техника в создании приборов и устройств: от использования только чисто механических (XIX век), а затем физических свойств материалов (начало XX века) к использованию свойств и энергии атомов и молекул вещества в наши дни.

Наука и техника в своем развитии не только непрерывно расширяют и углубляют фронт исследований, но и осуществляют тесное переплетение различных отраслей знаний. Часто это приводит не только к коренному пересмотру старых, казавшихся незыблемыми теорий, но и к возникновению совершенно новых направлений в исследовании законов природы, к открытию новых возможностей их практического использования. Квантовая электроника возникла и стала развиваться как новое направление на стыке уже существующих отраслей знаний в результате их подъема на новый, более высокий уровень развития, и создание квантовых генераторов является новой важной ступенью в развитии науки и техники.

Уже первые шаги на пути развития квантовой электроники показали большие возможности и перспективы ее практического применения. В книге кратко рассмотрены эти новые возможности, которые уже сегодня квантовая электроника предоставляет науке и технике, а также некоторые дальнейшие перспективы ее использования. В книге были перечислены далеко не все возможные применения квантовой электроники, однако даже те из них, о которых здесь рассказано, убедительно показывают нам, насколько беспредельны возможности, открываемые перед человечеством этой новой наукой.

Сейчас еще трудно предугадать все возможные области применения лазеров. Развитие квантовой электроники происходит такими быстрыми темпами, что каждый день могут появиться очередные сообщения о новых достижениях, полученных в той или иной области благодаря применению в ней лазерной техники.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 22 коп.